



Instituto Politécnico de Tomar

**Escola Superior de Tecnologia de Tomar**

# **COOPERAÇÃO ENTRE MÚLTIPLAS MICRORREDES INDUSTRIAIS AUTÓNOMAS**

Dissertação de Mestrado

**Eduardo Manuel Carvalho Pinheiro**

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica  
Especialização em Controlo e Eletrónica Industrial

**Tomar/ Novembro/ 2019**





Instituto Politécnico de Tomar

**Escola Superior de Tecnologia de Tomar**

**Eduardo Manuel Carvalho Pinheiro**

# **COOPERAÇÃO ENTRE MÚTIPLAS MICRORREDES INDUSTRIAIS AUTÓNOMAS**

Dissertação de Mestrado

Orientado por:

Professor Mário Gomes – IPT/ESTT

Professor Paulo Coelho – IPT/ESTT

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Tomar  
para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do  
grau de Mestre em Engenharia Eletrotécnica –  
Especialização em Controlo e Eletrónica Industrial





Este trabalho foi parcialmente apoiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e pelo PIDDAC, no âmbito do projeto INDuGRID (*Industrial Microgrid Project*) – *Efficient energy management in industrial microgrids with high penetration of PV technology*. Ref.: ERANet-LAC/0006/2014.



Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo centro de investigação Ci2.



Dedico este trabalho aos meus pais, Octávio e Isabel, aos quais estou eternamente grato por todo o apoio e por o que sou hoje, bem como a todos os que me apoiaram neste percurso.









## RESUMO

---

A crise energética e ambiental e por consequência a crescente procura de energia fomentou o desenvolvimento, em larga escala, das tecnologias baseadas em fontes de energia renovável e dos recursos energéticos distribuídos. A diversificação das respetivas fontes, originou a necessidade de incorporar geração distribuída nos sistemas de energia elétrica. A integração de geração distribuída permite minimizar as perdas de energia e aumentar os indicadores de qualidade. Os desenvolvimentos destas tecnologias fizeram surgir assim as microrredes elétricas. A sua inclusão nos sistemas elétricos permite o aumento do consumo de energia de base renovável, maior independência da rede principal de energia, aumento da fiabilidade do fornecimento de energia e maior resiliência a falhas inesperadas. No entanto, a contínua penetração de fontes de energia renovável de pequena e média dimensão tem estimulado a proliferação das microrredes nos sistemas elétricos admitindo uma abordagem mais ampla de considerar múltiplas microrredes. Este novo conceito compreende a associação de microrredes, baseando-se na sua cooperação. As múltiplas microrredes visam a maior integração e otimização conjunta dos recursos de energia distribuídos, permitem melhorar a estabilidade, fiabilidade e resiliência nos sistemas de energia, bem como a redução de custos e a redução de emissões poluentes.

A dissertação apresentada aborda aspetos como as arquiteturas referentes a microrredes, principais tecnologias de geração e armazenamento de energia, estratégias de controlo e gestão de energia. Aborda também a cooperação entre múltiplas microrredes, bem como uma visão geral do comércio de energia, focando o comércio *peer-to-peer* e a tecnologia *blockchain*. Por último, é apresentado um caso de estudo para avaliar a cooperação entre microrredes industriais no modo de operação isolado, através de três modelos de mercado distintos.

**Palavras-chave:** Microrrede, múltiplas microrredes industriais, arquitetura de MR e MMR, tecnologias de geração e armazenamento, modo de operação isolado, estratégias de controlo, gestão de energia, cooperação, eficiência energética, sistemas ciber-físicos.



## ABSTRACT

---

The energy and environmental crisis, and consequently the growing demand for energy has encouraged the large-scale development of technologies based on renewable energy sources and distributed energy resources. The diversification of the respective energy sources led to the need for incorporating distributed generation in electric power systems. The integration of distributed generation minimizes energy losses and increases quality indicators. The development of these technologies has given rise to electric microgrids. Their integration into electrical systems allows increased consumption of renewable-based energy, greater independence from the main energy grid, increased reliability of the energy supply and improved resilience to unexpected failures. However, the continuous penetration of small and medium-scale renewable energy sources has promoted the rapid increase of microgrids in electrical systems by allowing a broader approach and considering clusters of multiple microgrids. This new concept encompasses the association of microgrids into groups, focusing on their cooperation. Clusters of multiple microgrids aim at greater integration and joint optimization of distributed energy resources, improved stability, reliability and resilience in energy systems, as well as reduction of costs and polluting emissions.

This dissertation addresses aspects such as microgrid architectures, main technologies for power generation and storage, energy control and management strategies. It also addresses the cooperation among multiple microgrids, as well as an overview of energy trading focused on peer-to-peer trade and blockchain technology. Finally, a case study is presented to evaluate the cooperation among industrial microgrids in islanded operation mode through three different energy market models.

**Keywords:** Microgrid, industrial multiple microgrids, MG and MMG architecture, generation and storage technologies, islanded operation mode, control strategies, energy management, cooperation, energy efficiency, cyber-physical systems.



## AGRADECIMENTOS

---

A concretização desta dissertação de mestrado destaca o final de uma importante etapa. Deste modo, quero desde já, salientar um enorme agradecimento aos meus orientadores, professor Mário Gomes e professor Paulo Coelho por toda a disponibilidade, orientação e ajuda na realização deste trabalho. Contudo, não posso deixar de agradecer ao professor José Fernandes e colega bolseiro Filipe Bandeiras, também por todo o seu apoio prestado. Com todo o seu apoio e experiência foi possível o desenvolvimento deste trabalho e a submissão de artigos em conferência e revista.

Por último, mas não menos importante, devo um especial agradecimento aos meus pais por todo o apoio que me têm dado ao longo destes anos, ajudando-me assim a chegar ao final desta grande etapa. Agradeço também a todos os meus restantes familiares, amigos e colegas que sempre me apoiaram durante todo o meu percurso académico.





# ÍNDICE

---

Índice de Figuras .....	xix
Índice de Tabelas .....	xxi
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	xxiii
Lista de Símbolos .....	xxvii
1. Introdução .....	1
2. Arquitetura de Microrredes .....	5
2.1. Modos de Operação .....	6
2.1.1. Equipamento de Controlo da Microrrede .....	7
2.1.1.1. <i>Distribution Management System</i> .....	7
2.1.1.2. <i>MicroGrid Central Controller</i> .....	10
2.1.1.3. <i>Microsource Controller</i> .....	12
2.1.1.4. <i>Load Controller</i> .....	13
2.2. Metodologias de Operação .....	16
2.3. Controlo de Tensão e Potência Reativa nas Redes MT .....	17
2.4. Estratégias de Controlo .....	20
2.5. Tecnologias de Geração .....	23
2.6. Tecnologias de Armazenamento .....	25
3. Microrredes DC .....	29
3.1. Tipologias .....	29
3.2. Interconexão entre Microrredes DC e Redes AC .....	31
4. Múltiplas Microrredes .....	35
4.1. Coordenação de Múltiplas Microrredes .....	35
4.2. Arquiteturas de Múltiplas Microrredes .....	36
4.2.1. <i>Layout</i> .....	36

4.2.2.	Tecnologia de Linha.....	38
4.2.3.	Tecnologia de Interconexão .....	39
4.3.	Unidade Híbrida de Acoplamento Comum .....	42
4.3.1.	Arquitetura de Múltiplas Microrredes com Conexão Híbrida AC/DC .....	43
4.3.1.1.	Configuração Típica de Múltiplas Microrredes .....	44
4.3.1.2.	Arquitetura de MMR baseada em HUCC .....	45
4.3.2.	Configuração Básica da HUCC.....	47
5.	Cooperação entre Microrredes .....	51
5.1.	Teoria dos Jogos .....	52
5.1.1.	Valor de <i>Shapley</i> .....	53
5.2.	Troca de Energia.....	55
5.2.1.	Processo de Troca de Energia .....	56
5.3.	Colaboração na Troca de Energia.....	57
5.3.1.	Operação Conjunta.....	57
5.3.2.	Controlo Cooperativo.....	59
5.3.3.	Alocação de Custos .....	60
5.3.4.	Modelos de Custo.....	61
5.3.4.1.	Modelo de Custo de Geração Individual .....	62
5.3.4.2.	Modelo de Custo da Microrrede .....	62
5.3.4.3.	Modelo de Custo da Concessionária.....	63
5.3.4.4.	Modelo de Custo de Geração Conjunta .....	64
5.3.5.	Cálculo de Pagamento.....	65
6.	Comércio de Energia.....	67
6.1.	Conceito <i>Peer-to-Peer</i> .....	68
6.1.1.	Comércio <i>Peer-to-Peer</i> .....	69
6.2.	Tecnologia <i>Blockchain</i> .....	73

6.2.1.	Comércio de Energia de MMR baseados e <i>Blockchain</i> .....	75
6.2.2.	Tipos de <i>Blockchain</i> .....	77
6.2.3.	Métodos de Pagamento.....	78
7.	Sistemas Ciber-físicos .....	81
7.1.	Modelos de CPS para Aplicação Industrial .....	82
7.2.	Tipos de Ataques .....	83
7.3.	Análise do Desempenho dos CPS.....	84
7.3.1.	Robustez .....	85
7.3.2.	Segurança.....	85
7.3.3.	Resiliência .....	86
7.4.	Deteção de Ataques em CPS Industriais.....	86
7.4.1.	Deteção Bayesiana com Hipótese Binária.....	87
7.4.2.	Abordagem <i>Weighted Least Square</i> (WLS) .....	87
7.4.3.	X2 – Detetor baseado em Filtros de Kalman.....	88
7.4.4.	Técnicas quasi-FDI.....	89
7.5.	Aplicações dos CPS .....	89
7.6.	CPS em Microrredes .....	90
7.7.	Sistemas de Controlo Industrial .....	93
7.7.1.	Sistemas de Controlo e Supervisão .....	94
7.7.2.	<i>Industrial Internet of Things</i> .....	95
7.7.3.	Ameaças e Vulnerabilidades .....	95
7.8.	Defesa Cibernética para Energia e Serviços Públicos .....	97
7.8.1.	<i>Industrial Immune System</i> .....	98
8.	Caso de Estudo .....	103
8.1.	Múltiplas Microrredes.....	103
8.1.1.	Carga/Consumo .....	105

8.1.2. Geração.....	106
8.2. Algoritmo.....	109
8.2.1. Função <i>Linprog</i> .....	112
8.2.2. <i>Matpower</i> .....	116
8.3. Resultados.....	117
8.3.1. Modelo 1 - Ofertas de Venda .....	117
8.3.2. Modelo 2 - Ofertas de Compra.....	123
8.3.3. Modelo 3 - Ofertas de Venda e Compra .....	130
8.3.4. Comparação de Modelos .....	138
9. Conclusão.....	141
Referências .....	145

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1 - Arquitetura geral de uma microrrede.....	6
Figura 2 - Esquema de uma microrrede.....	7
Figura 3 - EcoStruxure™ Power SCADA Operation Software [8].....	8
Figura 4 - MicroGrid Central Controller [15] .....	11
Figura 5 - Grid IQ Microgrid Control System (MCS) [18] .....	13
Figura 6 - Load-shedding controller PML630 [20] .....	14
Figura 7 - Arquitetura de controlo e gestão de um sistema de múltiplas microrredes .....	17
Figura 8 - Hierarquia do controlo de tensão .....	20
Figura 9 - Esquema de controlo Single Master Operation .....	21
Figura 10 - Esquema de controlo Multi Master Operation.....	22
Figura 11 - Topologia de barramento único .....	30
Figura 12 - Topologia de múltiplos barramentos .....	30
Figura 13 - Topologia de barramento reconfigurável.....	31
Figura 14 - Aplicações de microrredes DC .....	33
Figura 15 - Microrredes conectadas em paralelo com a rede externa (GPCM) .....	37
Figura 16 - Microrredes interconectadas em série com a rede (GSIM) .....	37
Figura 17 - Conexão mista série-paralelo (MPSC) .....	38
Figura 18 - Operação e controlo centralizados .....	40
Figura 19 - Operação e controlo descentralizados.....	40
Figura 20 - Operação e controlo distribuídos .....	41
Figura 21 - Esquema de controlo hierárquico .....	43
Figura 22 - Configuração típica de múltiplas microrredes .....	44
Figura 23 - Múltiplas microrredes com HUCC .....	45
Figura 24 - Relação lógica de controlo [42] .....	49
Figura 25 - Conexão peer-to-peer.....	69
Figura 26 - Arquitetura geral dos CPS .....	82
Figura 27 - Esquema elétrico das múltiplas microrredes .....	104
Figura 28 - Perfil de carga para cada MR no modo de operação normal .....	105

Figura 29 - Perfil de carga para cada MR no modo de operação isolado .....	106
Figura 30 - Potência gerada a partir de painéis FV em cada MR.....	107
Figura 31 - Potência gerada a partir de WT em cada MR.....	107
Figura 32 - Potência armazenada no ESS em cada MR .....	108
Figura 33 - Fluxograma do algoritmo para o modelo 1 e modelo 2.....	109
Figura 34 - Ofertas de venda classificadas por ordem de mérito crescente do preço de energia .....	110
Figura 35 - Ofertas de compra classificadas por ordem de mérito decrescente do preço de energia .....	111
Figura 36 - Ofertas de venda e compra classificadas por ordem crescente e decrescente do preço de energia .....	112
Figura 37 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante h=15 .....	117
Figura 38 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante h=22 .....	119
Figura 39 - Resultados horários obtidos a partir do modelo 1 .....	121
Figura 40 - Preços horários obtidos do modelo 1.....	122
Figura 41 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante h=15 .....	124
Figura 42 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante h=22 .....	126
Figura 43 - Resultados horários obtidos a partir do modelo 2 .....	128
Figura 44 - Preços horários obtidos do modelo 2.....	129
Figura 45 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante h=15 .....	130
Figura 46 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante h=22 .....	132
Figura 47 - Resultados horários obtidos a partir do modelo 3 .....	135
Figura 48 - Preços horários obtidos do modelo 3.....	136
Figura 49 - Preços para o excesso de energia de acordo com as diferentes prioridades de carga .....	139

## ÍNDICE DE TABELAS

---

Tabela 1 - Equipamentos de controlo da MR .....	14
Tabela 2 - Comparação entre arquiteturas de múltiplas microrredes [6] .....	42
Tabela 3 - Estados de interruptor das múltiplas microrredes (MMR) [42] .....	47
Tabela 4 - Esquemas de controlo do MMC e do ESS [42].....	48
Tabela 5 - Principais benefícios da rede Peer-to-Peer no comércio de energia .....	71
Tabela 6 - Categorias de ataques cibernéticos .....	84
Tabela 7 - Arquitetura do sistema de controlo [101].....	92
Tabela 8 - Dados dos ramos .....	105
Tabela 9 - Geração de energia em cada MR.....	107
Tabela 10 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=15.....	118
Tabela 11 - Trânsitos de potências nos ramos para o instante de tempo h=15 .....	118
Tabela 12 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=22.....	120
Tabela 13 - Trânsitos de potência nos ramos para o instante de tempo h=22 .....	120
Tabela 14 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=15.....	124
Tabela 15 - Trânsitos de potências nos ramos para o instante de tempo h=15 .....	125
Tabela 16 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=22.....	126
Tabela 17 - Trânsitos de potências nos ramos para o instante de tempo h=22 .....	127
Tabela 18 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=15.....	131
Tabela 19 - Trânsitos de potências nos ramos para o instante de tempo h=15 .....	131
Tabela 20 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=22.....	133
Tabela 21 - Trânsitos de potências nos ramos para o instante de tempo h=22 .....	133





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

<b>AC</b>	– <i>Alternating Current</i>
<b>ADEPT</b>	– <i>Autonomous Decentralized Peer-to-Peer</i>
<b>ADMS</b>	– <i>Advanced Distribution Management System</i>
<b>AI</b>	– <i>Artificial Intelligence</i>
<b>APT</b>	– <i>Advanced Persistent Threats</i>
<b>AT</b>	– <i>Alta Tensão</i>
<b>BT</b>	– <i>Baixa Tensão</i>
<b>CAMC</b>	– <i>Central Autonomous Management Controller</i>
<b>CISO</b>	– <i>Chief Information Security Officer</i>
<b>CPS</b>	– <i>Cyber-Physical System</i>
<b>CPU</b>	– <i>Central Processing Unit</i>
<b>DC</b>	– <i>Direct Current</i>
<b>DCS</b>	– <i>Distributed Control Systems</i>
<b>DDOS</b>	– <i>Distributed Denial of Services</i>
<b>DER</b>	– <i>Distributed Energy Resources</i>
<b>DMS</b>	– <i>Distribution Management System</i>
<b>DoS</b>	– <i>Denial of Service</i>
<b>DPoS</b>	– <i>Delegated-Proof-of-Stake</i>
<b>DPS</b>	– <i>Distributed Parameter Systems</i>
<b>DRE</b>	– <i>Distributed Renewable Energy</i>
<b>DSO</b>	– <i>Distribution System Operator</i>
<b>ED</b>	– <i>Economic Dispatch</i>
<b>EMS</b>	– <i>Energy Management System</i>
<b>EPSO</b>	– <i>Evolutionary Particle Swarm Optimization</i>
<b>ESC</b>	– <i>Energy Sharing Coordinator</i>
<b>ESS</b>	– <i>Energy Storage System</i>
<b>ESU</b>	– <i>Energy Storage Unit</i>
<b>EV</b>	– <i>Electric Vehicles</i>

<b>FDI</b>	– <i>Fault Detection and Isolation</i>
<b>FV</b>	– Fotovoltaico
<b>GD</b>	– Geração Distribuída
<b>GEE</b>	– Gases de Efeito Estufa
<b>GOOSE</b>	– <i>Generic Object-Oriented Substation Event</i>
<b>GPCM</b>	– <i>Grid Parallel Connected Microgrids</i>
<b>GSIM</b>	– <i>Grid Series Interconnected Microgrids</i>
<b>HMI</b>	– <i>Human-Machine Interface</i>
<b>HUCC</b>	– <i>Hybrid Unit of Common Coupling</i>
<b>IACS</b>	– <i>Industrial Automation and Control Systems</i>
<b>ICES</b>	– <i>Integrated Community Energy Systems</i>
<b>ICS</b>	– <i>Industrial Control Systems</i>
<b>ICT</b>	– <i>Information and Communication Technologies</i>
<b>IED</b>	– <i>Intelligent Electronic Devices</i>
<b>IEEE</b>	– <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>IIoT</b>	– <i>Industrial Internet of Things</i>
<b>IoT</b>	– <i>Internet of Things</i>
<b>IP</b>	– <i>Internet Protocol</i>
<b>IT</b>	– <i>Information Technology</i>
<b>ITS</b>	– <i>Intelligent Transport System</i>
<b>LC</b>	– <i>Load Controller</i>
<b>M2M</b>	– <i>Machine-to-Machine</i>
<b>MAS</b>	– <i>Multi-Agent System</i>
<b>MC</b>	– <i>Microsource Controller</i>
<b>MCS</b>	– <i>Microgrid Control System</i>
<b>MF</b>	– Microfonte
<b>MG</b>	– <i>Microgrid</i>
<b>MGCC</b>	– <i>MicroGrid Central Controller</i>
<b>MIQP</b>	– <i>Mixed-Integer Quadratic Programming</i>
<b>MMC</b>	– <i>Modular Multilevel Converter</i>
<b>MMG</b>	– <i>Multiple Microgrids</i>
<b>MMO</b>	– <i>Multi Master Operation</i>

<b>MMR</b>	– Múltiplas Microrredes
<b>MMS</b>	– <i>Manufacturing Message Specification</i>
<b>MPSC</b>	– <i>Mixed Parallel-Series Connection</i>
<b>MR</b>	– Microrrede
<b>MT</b>	– Média Tensão
<b>OMS</b>	– <i>Outage Management System</i>
<b>P2G</b>	– <i>Peer-to-Grid</i>
<b>P2P</b>	– <i>Peer-to-Peer</i>
<b>PCC</b>	– <i>Point of Common Coupling</i>
<b>PD</b>	– Produção Dispersa
<b>PI</b>	– <i>Proportional-integral</i>
<b>PLC</b>	– <i>Programmable Logic Controller</i>
<b>PMU</b>	– <i>Phasor Measurement Unit</i>
<b>PoS</b>	– <i>Proof-of-Stake</i>
<b>POV</b>	– <i>Proof of Value</i>
<b>PoW</b>	– <i>Proof-of-Work</i>
<b>PSO</b>	– <i>Particle Swarm Optimization</i>
<b>RER</b>	– <i>Renewable Energy Resources</i>
<b>RES</b>	– <i>Renewable Energy Source</i>
<b>RoP</b>	– <i>Ratio of Power</i>
<b>RTU</b>	– <i>Remote Terminal Unit</i>
<b>SAIDI</b>	– <i>System Average Interruption Duration Index</i>
<b>SAIFI</b>	– <i>System Average Interruption Frequency Index</i>
<b>SANS</b>	– <i>System Administration Networking and Security</i>
<b>SCADA</b>	– <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
<b>SEE</b>	– Sistema Elétrico de Energia
<b>SG</b>	– <i>Smart Grid</i>
<b>SMO</b>	– <i>Single Master Operation</i>
<b>SMV</b>	– <i>Sampled Measured Values</i>
<b>SoC</b>	– <i>State of Charge</i>
<b>TCP</b>	– <i>Transmission Control Protocol</i>
<b>UC</b>	– <i>Unit Commitment</i>

<b>UMC</b>	– <i>Universal Microgrid Controller</i>
<b>UTXO</b>	– Unspent Transaction Output
<b>VLAN</b>	– <i>Virtual Local Area Network</i>
<b>VPN</b>	– <i>Virtual Private Network</i>
<b>VSI</b>	– <i>Voltage Source Inverters</i>
<b>WAMC</b>	– <i>Wide-Area Monitoring and Control</i>
<b>WLS</b>	– <i>Weighted Least Square</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

---

€	–	Euro
h	–	Hora
I	–	Intensidade de Corrente Elétrica
$i$	–	<i>Player i do jogo cooperativo</i>
kVAr	–	Quilovolt-ampere Reativo
kW	–	Quilowatt
kWh	–	Quilowatt-hora
kWp	–	Quilowatt-pico
MW	–	Megawatt-hora
$N$	–	Número total de <i>players</i> participantes no jogo cooperativo
P	–	Potência Ativa
P-f	–	Controlo de frequência em função da potência ativa
PQ	–	Controlo de potência ativa e reativa
pu	–	Por Unidade
P- $U_{DC}$	–	Controlo de tensão contínua em função da potência ativa
Q	–	Potência Reativa
Q-V	–	Controlo de tensão em função da potência reativa
$S$	–	Número de <i>players</i> da cooperação
$U_{DC}$	–	Controlo de tensão contínua
V	–	Volt
Vf	–	Controlo de tensão e frequência
$\varphi_i$	–	Valor de <i>Shapley</i>
$v$	–	Função característica que representa o benefício conjunto da cooperação $S$



## 1. INTRODUÇÃO

---

A crise energética e ambiental em todo o mundo fomentou o desenvolvimento, em larga escala, das tecnologias baseadas em fontes de energia renovável (*renewable energy sources* - RES) e dos recursos energéticos distribuídos (*distributed energy resources* - DER). Estas, por sua vez, deram origem ao conceito designado por produção dispersa (PD). O desenvolvimento destas tecnologias fizeram surgir um novo conceito ao nível da sua aplicação: as microrredes elétricas. Uma microrrede (MR) ou em literatura inglesa *Microgrid* (MG) é um sistema de energia elétrica de pequena escala que contém recursos distribuídos e cargas, podendo operar no modo conectado à rede ou no modo isolado. Assim, uma MR inclui unidades de microgeração, unidades de armazenamento de energia, unidades de controlo e um sistema de comunicação, bem como as cargas elétricas existentes. Toda esta infraestrutura deve estar integrada em uma única entidade [1, 2]. As MR devem garantir uma gestão energética eficiente através da coordenação dos recursos disponíveis, tendo em conta preocupações económicas e ambientais.

Uma instalação elétrica inteligente pode ser considerada uma MR se integrar geração e armazenamento de energia, bem como a necessária automatização e os meios de monitorização inteligente [3]. Uma MR pode ter várias dimensões, podendo corresponder a um único edifício (MR de pequena dimensão), a uma comunidade (MR de média dimensão), ou a uma cidade (MR de grande dimensão), e até mesmo a uma ilha. Como tal, as microrredes podem operar em (i) uma rede de baixa tensão (BT) ou (ii) em redes de distribuição de BT e de média tensão (MT). A integração das microrredes nas redes de distribuição de MT pode originar problemas ao nível do controlo da potência reativa / regulação da tensão. Para contornar este facto, utilizam-se estratégias de otimização das condições de operação destes sistemas. Recorre-se, assim, à capacidade de controlo das interfaces eletrónicas das fontes de geração distribuída (GD) e das microrredes através da aplicação de algoritmos de otimização. O desenvolvimento tecnológico, em diversas áreas, tem contribuído para uma maior procura de novos tipos de recursos, como por exemplo, veículos elétricos, cargas controláveis (*e.g.*, ar condicionado, termoacumuladores, câmaras frigoríficas). Estes novos tipos de recursos apresentam características que possibilitam uma

maior flexibilidade de operação das microrredes. Por outro lado, as microrredes podem funcionar tanto em AC, como em DC, ou em AC e DC [4]. A integração de microrredes nos sistemas de distribuição apresenta diversas vantagens, tais como:

- As unidades DER fornecem energia localmente, reduzindo a dependência da rede a montante e aumentando a fiabilidade na alimentação das cargas;
- O consumo de energia é assegurado, em parte ou na sua totalidade, por GD (*e.g.*, turbinas eólicas, painéis fotovoltaicos e células de combustível). Assim, o fornecimento de energia por parte dos GD contribui para reduzir as perdas de transmissão.

A nível ambiental também há ganhos significativos, como a redução dos gases de efeito de estufa pelo facto das MR recorrerem, essencialmente, a recursos endógenos. Por outro lado, do ponto de vista económico, há benefícios associados com custos evitados em termos de reforço do sistema, nomeadamente em transformadores e em linhas de transmissão [4, 5].

O desenvolvimento das MR e a sua proliferação nos sistemas de energia deu origem ao conceito de múltiplas microrredes (MMR). Uma MMR ou em literatura inglesa *multiple microgrids* (MMG) consiste em um aglomerado de microrredes interligadas numa determinada área de influência elétrica. A operação de MMR possibilita a crescente penetração de energia de base renovável (geração eólica e fotovoltaica intermitentes) nos sistemas de distribuição. As MMR também asseguram uma gestão mais eficiente dos recursos de energia renovável (*renewable energy resources* - RER), contribuindo para uma maior flexibilidade de operação. As MMR, com microrredes bem projetadas, aumentam significativamente a fiabilidade do sistema. Tal como nas MR, o fornecimento de energia às cargas faz-se através da rede pública (tipicamente em MT) e das MF (microfontes) – GD – inseridas na respetiva MMR. A participação das múltiplas microrredes no fornecimento de serviços auxiliares à rede, permite melhorar a estabilidade dinâmica do sistema de energia. Em síntese, o principal objetivo das MMR consiste em aumentar a resiliência, a estabilidade e a segurança dos sistemas elétricos, fornecendo energia sem perturbações e interrupções. Para a coordenação de múltiplas microrredes são utilizadas duas abordagens, a abordagem centralizada e a abordagem descentralizada [6].

A presente dissertação é constituída por nove capítulos, englobando este capítulo introdutório que aborda o conceito de MR e MMR, a sua operação e potenciais benefícios associados à sua implementação em sistemas de energia. A dissertação sumariza também a



importância das MR para ajudar a combater a crise energética e ambiental. O segundo capítulo aborda o conceito de MR e a sua arquitetura. Neste capítulo são também apresentados de forma generalizada os equipamentos de controlo, as estratégias para garantir uma operação segura e correta da rede durante os dois modos de operação, bem como as principais tecnologias de geração e armazenamento de energia. No terceiro capítulo referem-se os benefícios da operação, bem como as tipologias de microrredes DC e a sua interconexão com redes AC. O quarto capítulo refere-se ao conceito de múltiplas microrredes, sendo abordadas em profundidade as diferentes arquiteturas de interconexão para microrredes, bem como uma arquitetura de conexão híbrida (interfaces AC e DC). Este capítulo também aborda o controlo e gestão de energia, sendo apresentada uma visão geral e uma comparação dos esquemas de controlo para gestão de energia em aglomerados de microrredes. O quinto capítulo diz respeito à cooperação e troca de energia entre múltiplas microrredes, apresentando também uma visão geral sobre o conceito da teoria dos jogos cooperativos. No sexto capítulo é abordado o comércio de energia em *smart grids* e em múltiplas microrredes. É também abordado o conceito de comércio de energia *peer-to-peer* (P2P) e a tecnologia *blockchain* para os mercados de energia nas microrredes. O sétimo capítulo é referente a sistemas ciber-físicos em aplicações industriais. Neste capítulo são apresentados de forma sucinta os diferentes tipos de ataques cibernéticos, bem como o desempenho dos sistemas ciber-físicos. Este capítulo também aborda a integração de sistemas ciber-físicos em sistemas de microrredes e os sistemas de controlo industrial. No oitavo capítulo é apresentado um caso de estudo que consiste em avaliar a cooperação de cinco microrredes industriais no modo de operação isolado. Este capítulo apresenta o algoritmo desenvolvido para avaliar a cooperação entre as microrredes em causa e para coordenar o seu comércio de energia horário através de três modelos de mercado distintos, estabelecendo preços e quantidades de compensação de mercado, no mercado de eletricidade centralizado (*pool*) assimétrico. No nono capítulo, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado, referentes aos aspetos abordados nos capítulos anteriores.



## 2. ARQUITETURA DE MICRORREDES

---

A arquitetura de uma MR contempla um MGCC (*MicroGrid Central Controller*), instalado no ponto de interligação PCC (*point of common coupling*) com a rede MT. O MGCC constitui o primeiro nível hierárquico das MR. A função deste dispositivo é assegurar uma gestão harmonizada da MR, em termos técnicos e económicos.

O MGCC tem a capacidade de:

- Fornecer previsões de consumo de cargas;
- Fornecer previsões da capacidade produtiva de MF intermitentes (*e.g.*, solar, eólica);
- Aceder a preços de mercado;
- Fornecer propostas para o mercado;
- Configuração de prioridades das cargas a alimentar.

O segundo nível hierárquico das MR é composto pelos controladores MC (*Microsource Controller*) e LC (*Load Controller*). O MC é o controlador responsável pelos sistemas de armazenamento de energia e das MF. O MC permite o controlo da produção de potência ativa e reativa (exceto em casos em que as MF não o permitam). Este dispositivo também pode aceder aos preços de combustível e de eletricidade do mercado. Com estas informações, o controlador otimiza a capacidade de produção local e determina a energia que a MR deve absorver da rede de distribuição de MT. O LC tem a função de controlar as cargas, tendo a capacidade de deslastrar cargas não prioritárias, mantendo as cargas consideradas prioritárias.

De forma a que estes controladores possam comunicar entre si, é essencial que as MR integrem uma rede de comunicação. Esta rede permite a comunicação entre o MGCC e os MC e LC. A comunicação entre dispositivos consiste basicamente no envio de *set points* do MGCC para os MC e LC. Para este efeito, é necessária a comunicação de leituras das potências ativa e reativa dos MC/LC para o MGCC. O volume de dados partilhados entre dispositivos deve ser reduzido.

Numa MR também é necessário assegurar a comunicação entre o MGCC e o DMS (*Distribution Management System*), que se encontra do lado do operador do sistema (rede

pública). Deste modo, a interligação - MR e SEE (Sistema elétrico de energia) - viabiliza a participação da MR para a operação da rede em melhores condições. A MR poderá colaborar nos serviços auxiliares do sistema (regulação de tensão e controlo de potência reativa), melhorando a estabilidade dinâmica do sistema - como referido anteriormente [2, 3].

Na Figura 1 apresenta-se o diagrama da arquitetura geral de uma microrrede.

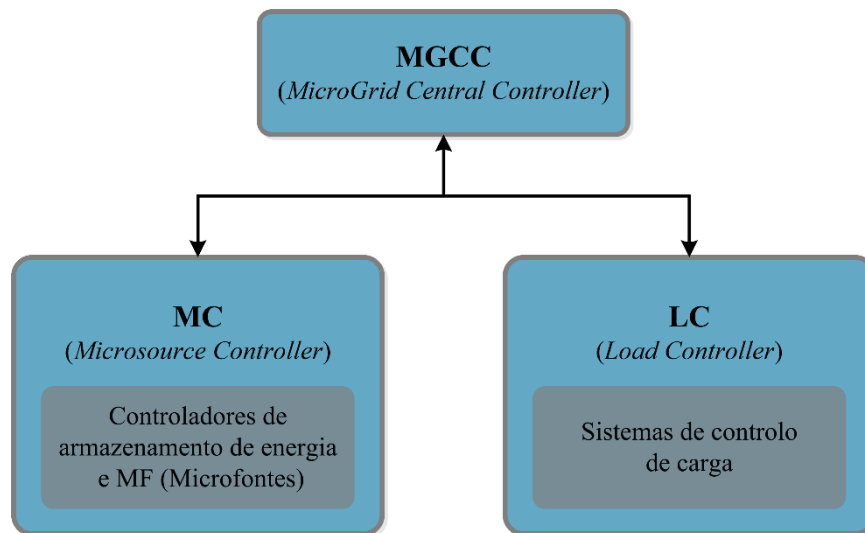


Figura 1 - Arquitetura geral de uma microrrede

## 2.1. Modos de Operação

As MR podem operar em dois modos de funcionamento, sendo definidos como:

- **Funcionamento em modo normal:** A MR está interligada à rede pública (em MT), sendo alimentada total ou parcialmente por esta. A MR também pode injetar potência na rede (consoante a relação entre a produção das MF e o consumo da MR);
- **Funcionamento em modo de emergência:** Este modo consiste na necessidade da MR funcionar em regime isolado. Na eventualidade de uma falha da rede pública (de MT), ou caso seja necessária alguma intervenção planeada na MR (*e.g.*, manutenção), esta funcionará desligada da rede de MT.

Na Figura 2 apresenta-se o esquema unifilar de uma MR interligada com a rede de MT através do PCC. Nesta figura estão representados os diversos controladores (DMS, MGCC,

MC e LC) bem como alguns dos possíveis recursos MF, sistemas de armazenamento e respetivas linhas de comunicação.

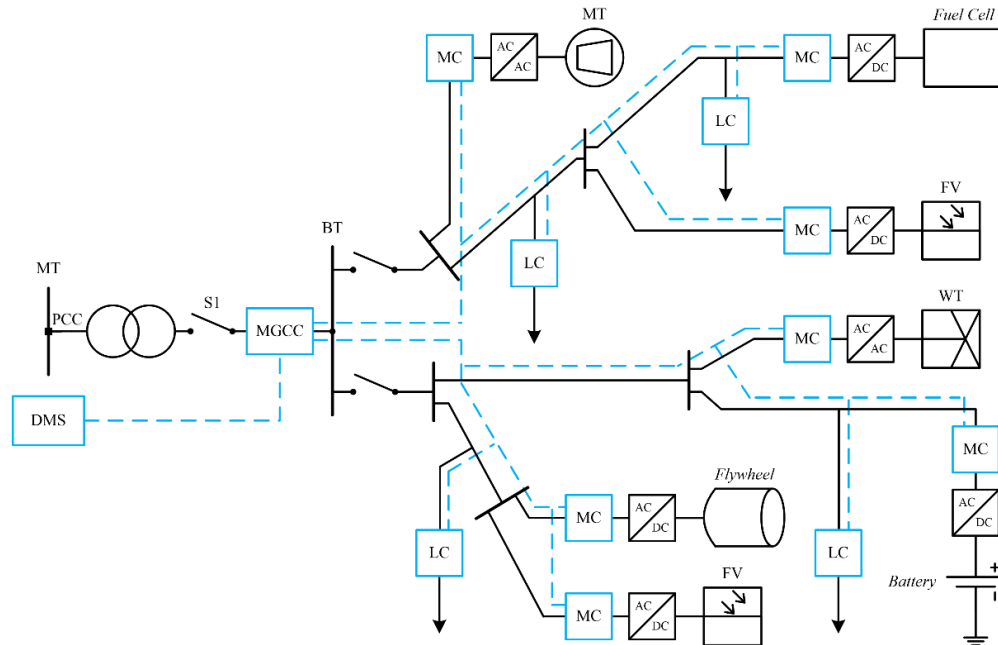


Figura 2 - Esquema de uma microrrede

Através desta figura é possível visualizar os dois modos de funcionamento da MR (ligado e isolado). No modo de funcionamento ligado à rede de MT, o seccionador S1 encontra-se na posição “Fechado”. Por outro lado, no modo de funcionamento isolado o seccionador S1 estará na posição “Aberto”.

### 2.1.1. Equipamento de Controlo da Microrrede

Em seguida são apresentados os principais equipamentos de controlo que constituem a MR, bem como as suas principais características e funcionalidades. Os principais equipamentos abordados são: o *Distribution Management System* (DMS), o *MicroGrid Central Controller* (MGCC), o *Microsource Controller* (MC) e o *Load Controller* (LC).

#### 2.1.1.1. *Distribution Management System*

As microrredes requerem a aplicação de dispositivos de gestão e controlo avançados (*Advanced Distribution Management System* - ADMS). Estes dispositivos governam o

funcionamento da MR, otimizando diversos requisitos, tais como: qualidade de energia, fiabilidade do sistema e impacto ambiental. A implementação de ADMS em MR interligadas à rede pública devem cumprir as normas do operador da rede e integrar funções destinadas ao funcionamento da MR em mercados de eletricidade.

De acordo com [7], o ADMS consiste na combinação dos seguintes subsistemas:

- SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) para monitorização e controlo;
- EMS (*Energy Management System*) para operações de transmissão;
- OMS (*Outage Management System*) para garantir uma maior resiliência e fiabilidade.

Os ADMS proporcionam a optimização dos recursos existente (*e.g.* geração distribuída e armazenamento de energia). Adicionalmente, também asseguram uma menor taxa de interrupções de energia na MR. Os ADMS são plataformas modulares e flexíveis, que disponibilizam um determinado modelo de dados e uma estrutura de integração de recursos, de modo a garantir uma infraestrutura segura.



**Figura 3 - EcoStruxure™ Power SCADA Operation Software [8]**

O *EcoStruxure™ Power SCADA Operation* (Figura 3) é um *software* de monitorização, controlo e de aquisição de dados, utilizado nas redes de distribuição de energia elétrica. Este *software* permite o controlo da rede através de uma interface intuitiva, interativa e personalizável, otimizando a disponibilidade de energia [8]. Existem *softwares* de outros

fabricantes com funcionalidades idênticas, como por exemplo o *EcoStruxure™ Power Monitoring Expert* [9], o *Microgrid Plus Control System* [10] ou o *Powermanager Software* [11].

Assim, a monitorização, gestão e controlo das microrredes pode ser realizado através dos *softwares* referidos acima. No entanto, existem *softwares* (com as mesmas características) mais específicos para as MR. Neste caso, indicam-se os seguintes: *EcoStruxure Microgrid Advisor* e o *EcoStruxure Microgrid Operation*.

O *EcoStruxure Microgrid Advisor* é uma plataforma de *software* de gestão de energia baseada em nuvem. Esta ferramenta possibilita a gestão automática, dinâmica e remota dos recursos de energia distribuídos (DER) – maximização da produção de energia de base renovável e minimização dos custos de energia – utilizando modelos de previsão e otimização fiáveis. Este *software* permite o controlo dinâmico e flexível dos recursos e cargas de energia no local, edifício / fábrica, otimizando o desempenho das suas instalações (como e quando consumir, produzir e armazenar energia). Esta interface também proporciona funções referentes aos ganhos económicos e ambientais (realizando-o, se necessário, em tempo real). A interface pode ser configurada/adaptada a uma determinada estratégia de controlo da MR, *e.g.*, para aumentar a eficiência e a flexibilidade de operação da MR [12].

O *EcoStruxure Microgrid Operation* é uma solução escalável, de alto desempenho, que se encarrega da gestão (em tempo real) dos recursos de produção de energia renovável e dos equipamentos de consumo existentes em microrredes. Esta plataforma disponibiliza recursos avançados de controlo e gestão de energia com uma estrutura simples baseada num controlador de MR ou em SCADA/HMI (*Human-Machine Interface*) local. O *EcoStruxure Microgrid Operation* também permite gerir automaticamente, dinamicamente e remotamente os DER, de modo a aproveitar o máximo de energia renovável e controlar melhor os custos de energia. Os principais benefícios desta ferramenta são: maximizar o uso de energia renovável; estrutura simples, robusta e escalável; integra recursos avançados de segurança cibernética; fácil operação e manutenção; otimização de energia; compatível com o *EcoStruxure Microgrid Advisor* [13].

Esta ferramenta assegura o funcionamento das MR nas duas tipologias operação:

- Microrredes conectadas à rede (com capacidade de isolamento);
- Microrredes isoladas (com capacidade de interligação).

O DMS fornece funções avançadas de monitorização, análise, controlo, optimização e planeamento. O DMS permite às empresas de serviços públicos a capacidade de fornecerem energia de forma mais fiável, segura e eficiente. Os principais benefícios do DMS são [14]:

- Proteger e otimizar o desempenho da rede de distribuição;
- Melhorar a resiliência da rede;
- Melhorar os índices de fiabilidade e de qualidade da rede de distribuição;
- Proporcionar melhores condições de funcionamento das instalações consumidoras.

#### **2.1.1.2. *MicroGrid Central Controller***

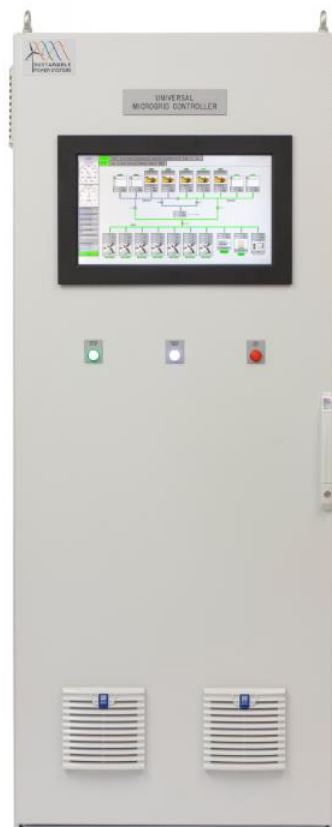
O MGCC, ou *Universal Microgrid Controller* (UMC), é um controlador central específico para microrredes. O MGCC é o elemento responsável pela gestão e controlo de uma MR de modo a assegurar o seu fornecimento de eletricidade nas melhores condições de estabilidade/segurança e fiabilidade. Este dispositivo está interligado com o *Microsource Controller* (MC) e o *Load Controller* (LC) através de uma rede de comunicação. A comunicação entre estes dispositivos consiste basicamente no envio de *set points* do MGCC para os MC e LC. O MGCC determina a quantidade de energia renovável que pode ser integrada na microrrede, reduzindo os custos de energia e a quantidade de emissões de carbono. Este equipamento proporciona a operação otimizada das MR, assegurando a independência energética (da rede ou de outra fonte de combustível, *e.g.*, diesel) sempre que as condições o permitam.

Assim, o MGCC é um sistema de monitorização e controlo de microrredes, que coordena a operação de uma ampla variedade de componentes, incluindo sistemas fotovoltaicos, turbinas eólicas, geradores a diesel, cargas secundárias e dispositivos de armazenamento de energia [15]. Este tipo de controlador lida com os desafios técnicos da implementação e das operações da MR. O MGCC garante a operação constante da microrrede com o máximo desempenho, diminuindo em simultâneo os custos e o impacto ambiental associados à produção de energia.



As principais características deste dispositivo são: equipamento universal (aplicável a uma ampla diversidade de MR); implementação direta, rápida e fácil; capacidade de controlar a MR usando 100% de energia renovável; é escalável, flexível e extensível (permitindo a sua adaptação conforme as alterações na configuração da MR); inclui atributos de cibersegurança (computadores com proteção de senha multicamada, dados criptografados, utilizando VLANs (*Virtual Local Area Network*) para sigilo de tráfego, *firewalls* e *switches* inteligentes); “Self-healing” microgrid (mantém a integridade, fiabilidade e estabilidade do sistema caso uma fonte de geração de energia fique *off-line*); monitorização remota das MR (garantindo a viabilidade a longo prazo e a capacidade de suportar essas microrredes em locais remotos); monitorização e controlo em tempo real e por último, tem uma interface intuitiva.

Na Figura 4 apresenta-se o MGCC fabricado pela *SUSTAINABLE POWER SYSTEMS*.



**Figura 4 - MicroGrid Central Controller [15]**

As principais aplicações do MGCC são: eletrificação de aldeias remotas; eletrificação isolada (em ilhas); bombeamento de água; eletrificação industrial remota e em microrredes distribuídas [16].

Existem equipamentos de outros fabricantes com esta funcionalidade como o caso do Multilin F650 fabricado pela *General Electric* [17].

### **2.1.1.3. *Microsource Controller***

O MC é o controlador responsável pelo controlo dos DER, *e.g.*, sistemas de armazenamento de energia e MF (sistemas FV, turbinas eólicas). Este dispositivo permite o controlo da produção de potência ativa e reativa (exceto em casos que a MF não permita), e também o controlo dos consumos associados com o carregamento dos sistemas de armazenamento. O MC também poderá ter acesso aos preços de combustível e eletricidade do mercado. Com estes dados, e em situações específicas – *e.g.* ausência do MGCC –, o controlador poderá determinar a capacidade de energia que a MR deverá absorver da rede de distribuição a montante de MT, otimizando a capacidade de produção local.

O *Grid IQ Microgrid Control System* (MCS), fabricado pela *General Electric*, é um equipamento com a finalidade de MGCC e/ou de MC [18]. Este equipamento permite que os operadores da rede de distribuição integrem e otimizem as fontes de energia com o objetivo de reduzir o custo total de energia de uma rede de distribuição local (Microrrede). O MCS fornece uma solução simples e eficaz para a integração de DER, baseados em energias renováveis e/ou em combustíveis fósseis, bem como em sistemas de armazenamento de energia, otimizando a operação de uma MR local. Outros benefícios deste equipamento são: mantém a operação das fontes de energia segura e fiável para garantir a alimentação das cargas críticas (operação da MR em modo isolado); integra o controlo de tensão e potência reativa da MR (operação segura e fiável); maximiza o uso de fontes de energia renovável para reduzir as emissões de gases com efeitos de estufa (GEE) e o impacto ambiental.



Figura 5 - Grid IQ Microgrid Control System (MCS) [18]

Existem equipamentos de outros fabricantes com esta funcionalidade como o caso do Easergy T300 fabricado pela *Schneider Electric* [19].

#### 2.1.1.4. *Load Controller*

O LC tem como principal função evitar cortes de energia e interrupções na rede de distribuição, desligando cargas com eventuais anomalias no seu funcionamento. Um equipamento com a funcionalidade de LC é o *Load-shedding controller* PML630, fabricado pela ABB [20]. Este equipamento é versátil e configurável, permitindo proteger redes industriais, de serviços públicos e infraestruturas com múltiplas fontes de energia e cargas críticas contra cortes de energia (*blackouts*) relacionados com perturbações na rede e/ou perdas de produção de energia. Na ocorrência de uma perturbação na rede, este dispositivo disponibiliza o fornecimento de energia para cargas críticas (prioritárias), desligando as cargas não prioritárias de forma rápida, precisa e seletiva. Este dispositivo também visa minimizar a frequência e a duração de interrupções de energia na rede de distribuição, bem como evitar danos nos equipamentos elétricos e/ou em processos de produção industriais.

As principais características deste produto são: garantir a alta disponibilidade dos processos por meio de uma solução de alto desempenho (padrão de comunicação IEC61850, que permite a rejeição de carga até 20 ms após a deteção da perturbação); integração otimizada de proteção e controlo; funcionalidade de gestão de energia em equipamentos de média tensão; flexibilidade, escalabilidade, integração e personalização do sistema (cumprindo uma variedade de requisitos); deslastre de cargas disponíveis em todos os dispositivos.



Figura 6 - Load-shedding controller PML630 [20]

Algumas características importantes deste equipamento são: o deslastre rápido de cargas em situações de perda de geração de energia; o deslastre lento de cargas devido a sobrecarga de fontes de energia ou devido a excesso de carga alimentada através da interligação com a rede elétrica; deslastre manual de cargas indicado pelo operador da rede (com base nos requisitos definidos nos *grid codes*); suporta o padrão de comunicação nativa IEC 61850, incluindo mensagens GOOSE (*Generic Object-Oriented Substation Event*) analógicas e binárias para redução de ligações físicas e comunicação supervisionada. Contudo, para redes elétricas maiores e deslastre de cargas rápido, é necessário distribuir o funcionamento do sistema por dois ou três dispositivos PML630.

No entanto, existem equipamentos de outros fabricantes para esta funcionalidade como, por exemplo, o C90 Automation Control System fabricado pela *General Electric* [21], bem como o Acti 9 CDS fabricado pela *Schneider Electric* [22].

Na Tabela 1 apresentam-se, sucintamente, as principais características e funcionalidades dos principais equipamentos de controlo de uma MR.

Tabela 1 - Equipamentos de controlo da MR

Equipamento	Características	Funcionalidades
DMS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fornecimento de energia com altos níveis de segurança e eficiência.</li> <li>Adaptação da geração e armazenamento de energia distribuídos às condições climáticas e interrupções mais frequentes.</li> </ul>	Consiste em fornecer funções avançadas de monitorização, análise, controlo e otimização na operação da rede.

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maior resiliência e fiabilidade.</li> <li>• Menores emissões (CO<sub>2</sub>).</li> </ul>	
<b>MGCC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Implementação direta, rápida e fácil.</li> <li>• Capacidade para controlar a MR usando 100% de energia renovável.</li> <li>• Escalável, flexível e extensível, permitindo a sua adaptação conforme as alterações na configuração da MR.</li> </ul>	Envio de <i>set points</i> para os MC e LC. Determina a quantidade de energia renovável que pode ser integrada na MR.
<b>MC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite que os operadores da rede de distribuição integrem e otimizem as fontes de energia, reduzindo custos de energia.</li> <li>• Maximiza o uso de fontes de energia renovável para reduzir as emissões de gases com efeitos de estufa (GEE) e o impacto ambiental.</li> <li>• Controlo de tensão e potência reativa.</li> </ul>	Controlo do armazenamento de energia e das MF. Possibilita o acesso a preços de combustível e de eletricidade do mercado.
<b>LC</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versátil e configurável.</li> <li>• Protege redes industriais, de serviços públicos e infraestruturas com múltiplas fontes de energia e cargas críticas contra cortes de energia (<i>blackouts</i>).</li> <li>• Deslastre de cargas em até 20 ms após a deteção de uma perturbação.</li> </ul>	Mitiga cortes de energia e interrupções na rede de distribuição, desligando cargas com eventuais anomalias no seu funcionamento.

Estes equipamentos integram sistemas de comunicação que suportam várias interfaces para executarem as funcionalidades associadas. O padrão de comunicação mais comum entre estes equipamentos é o IEC 61850. O IEC 61850 permite a comunicação entre dispositivos ligados a um sistema elétrico, suportando protocolos que podem ser executados em redes TCP/IP (Ethernet). Este padrão de comunicação define modelos de dados, eventos e configurações para IED (*Intelligent Electronic Devices*). Os modelos de dados podem ser mapeados por vários protocolos, como MMS (*Manufacturing Message Specification*), GOOSE (*Generic Object-Oriented Substation Event*), bem como o SMV (*Sampled Measured Values*) [23]. Permite a integração de funções de proteção, controlo e medição, tal como nas aplicações de subestações. As principais vantagens deste padrão são [24]:

- Facilidade de configuração;
- Infraestrutura padrão, utilizando principalmente Ethernet;
- Interoperabilidade entre dispositivos de diversos fabricantes.

Contudo, existem outros protocolos que podem ser usados, tais como o DNP 3.0, MODBUS, PROFIBUS, PROFINET, entre outros [24].

## **2.2. Metodologias de Operação**

Quando uma MR é conectada à rede, a sua estabilização é efetuada pela rede principal. Dado que a capacidade da rede é muito superior, a MR não causa variações de frequência no sistema. No entanto, no modo de operação isolado a estabilização é indispensável para evitar falhas na MR.

Para uma MR funcionar em modo isolado, esta tem de ter a capacidade de satisfazer o consumo através da geração e armazenamento locais, mantendo a estabilidade dos parâmetros de tensão e frequência.

O funcionamento de uma MR em modo isolado é justificado pelos benefícios associados. Por exemplo, quando o custo de falta de fiabilidade da rede principal é superior ao custo da fiabilidade melhorada através do funcionamento em modo isolado e da receita associada a este modo. Para este efeito, o custo da falta de fiabilidade para a MR pode ser calculado através dos seguintes índices: índice de duração média de interrupção do sistema (SAIDI) e índice de frequência média de interrupção do sistema (SAIFI) [3].

Para permitir o isolamento de uma MR, as proteções serão localizadas no ponto de interconexão da MR com a rede. Deste modo, não haverá influência das DER na rede externa (rede principal). As DER da MR podem reagir às variações de frequência impedindo a atuação de proteções. No caso de desconexão de DER, estas serão religadas logo após a MR começar a operar em modo isolado.

A possibilidade da MR participar em serviços auxiliares, como o controlo de potência reativa para estabilidade de tensão ou controlo de potência ativa para estabilidade de frequência é relevante, pois aumenta a competição nos mercados de regulação.

### 2.3. Controlo de Tensão e Potência Reativa nas Redes MT

Um dos principais problemas, com a integração de microrredes, é o controlo de potência reativa e de tensão nas redes de distribuição de média tensão (MT). De modo a contornar esta situação são utilizadas estratégias de otimização das condições de operação. A otimização é feita recorrendo à capacidade de controlo das interfaces eletrónicas das fontes de geração distribuída (GD) e das microrredes através da aplicação de algoritmos de otimização.

O funcionamento técnico da transposição de microrredes para a rede MT requer o controlo de todas as células ativas, bem como das subestações passivas das redes de MT e BT. Este controlo é efetuado pelo Controlador Central de Gestão Autónoma (CAMC), instalado no ponto de ligação entre a rede de alta tensão (AT) e a subestação da rede de alta/média tensão (AT/MT). Este dispositivo serve de interface para o Sistema de Gestão de Distribuição (DMS), sob a responsabilidade do operador do sistema de distribuição (DSO) [1, 3].

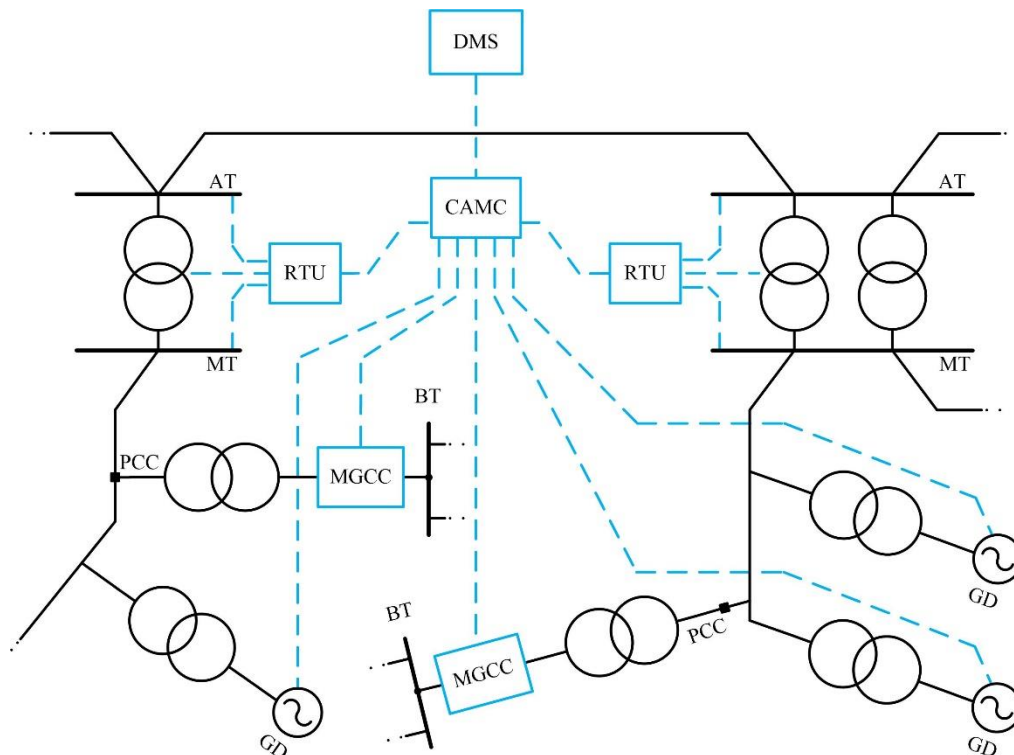


Figura 7 - Arquitetura de controlo e gestão de um sistema de múltiplas microrredes

Nas redes de distribuição com microrredes incorporadas, o controlo de tensão é um problema de otimização de estado estacionário, com características não-lineares e discretas, e com uma forte estrutura hierárquica. Este facto implica ter de lidar com subáreas de controlo de tensão para cada nível de tensão. Os serviços secundários de tensão podem ser fornecidos por microrredes operando no modo ligado à rede ou no modo isolado. Já os serviços terciários de tensão podem ser fornecidos somente no modo de operação conectado à rede.

O esquema de controlo de tensão pode ser constituído por três níveis hierárquicos, de acordo com as áreas de ação e tempo de atuação [25, 26]. As definições dos respetivos níveis de controlo são as seguintes:

#### **A. Controlo de tensão primário**

O nível de controlo primário é o mais baixo da estrutura de controlo. Este nível tem como função ajustar a referência de tensão fornecida aos circuitos internos de controlo de tensão e corrente, num tempo de resposta muito curto. Por outras palavras, tem como objetivo garantir uma operação normal e estável de cada unidade conversora. Este nível de controlo é o que tem maior prioridade, podendo manter a tensão do barramento estável, sem utilização da linha de comunicação. Permite a troca de energia entre GD, de modo a mitigar a corrente circulante que surge quando os VSI (*voltage source inverters*) operam em paralelo. Quando a MR opera em modo isolado, o controlo primário partilha os consumos de energia ativa e reativa entre os VSI a operar em paralelo independentemente das suas impedâncias de saída. Quando a MR opera em modo conectado à rede, cada um dos VSI injeta a energia que tem programada.

#### **B. Controlo de tensão secundário**

Este nível de controlo tem como objetivo principal resolver o problema do desvio de tensão ou de corrente. No controlo de tensão primário, a troca de energia pode originar desvios de frequência e tensão em relação aos seus valores nominais no PCC (em modo isolado). Deste modo, é necessário o controlo de tensão secundário para restaurar a tensão da MR. Este controlo é centralizado e localizado no MGCC, onde são enviados os valores corrigidos para todos os VSI em paralelo, através de uma rede de comunicações de baixa largura de banda. O MGCC também poderá conter



um *loop* de sincronização para facilitar a transição. Ou seja, fazer uma transição suave do modo de operação isolado para o modo de operação conectado à rede.

### **C. Controlo de tensão terciário**

O controlo terciário é o nível com menor prioridade, constituindo o topo da estrutura de controlo. Um dos seus principais objetivos é alcançar a operação ideal da MR durante o modo isolado e o fluxo de potência ideal durante o modo conectado à rede. Este controlo ajusta os *set points* para o controlador secundário, de modo a que a MR tenha uma operação económica e eficiente. A operação deste nível de controlo de tensão é mais lenta, sendo responsável por programar a energia de cada GD.

No controlo de tensão e potência reativa, os requisitos mais comuns são:

- Manutenção da tensão nos barramentos dentro dos limites especificados;
- Controlo de transformadores, linhas e alimentadores de carga;
- Minimização das perdas de energia ativa;
- Gestão das fontes de energia reativa;
- Controlo do fator de potência.

O CAMC terá como função a implementação destas funcionalidades, tendo a capacidade de controlar os fluxos de energia reativa das várias MR, através dos MGCC. O CAMC também otimiza a operação global do sistema com múltiplas microrredes (MMR) com a finalidade de minimizar os fluxos de potência reativa e melhorar os perfis de tensão. A Figura 8 seguinte apresenta a hierarquia do controlo de tensão.

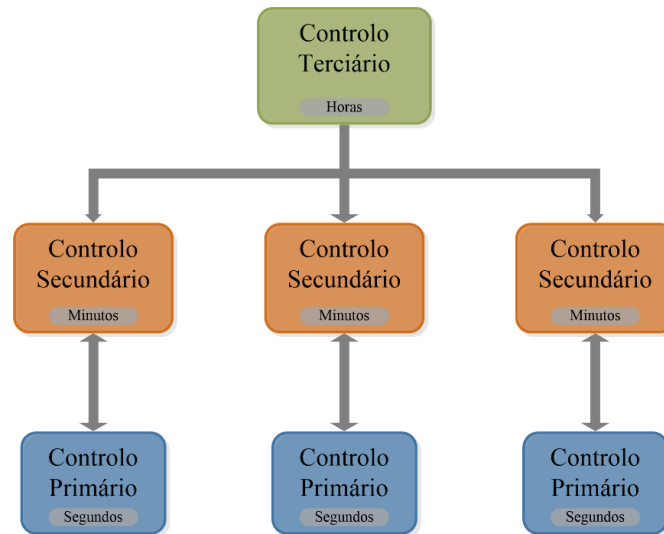


Figura 8 - Hierarquia do controlo de tensão

Na otimização das condições de operação são utilizados algoritmos com a finalidade de contornar os problemas no controlo de potência reativa e tensão nas redes de distribuição. Para este fim, em [1] é utilizado como base o algoritmo *Particle Swarm Optimization* (PSO). Neste caso, os autores apresentam um algoritmo que classificam de mais robusto, designado por *Evolutionary Particle Swarm Optimization* (EPSO). Este algoritmo EPSO consiste numa combinação do algoritmo PSO e de estratégias evolutivas com funções associadas com o controlo da tensão/potência reativa.

Em [1] são apresentados estudos de controlo de tensão e de potência reativa, para diversos cenários, utilizando o algoritmo EPSO. A função objetivo associada ao problema consiste na minimização das perdas de energia ativa. Os autores concluem que o algoritmo é bastante eficiente.

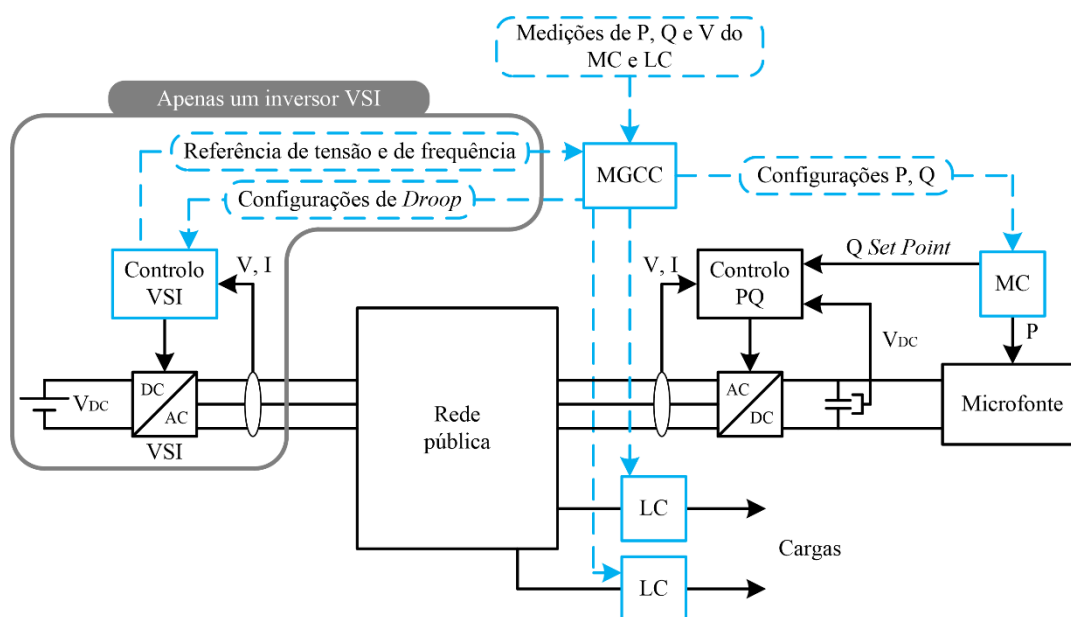
## 2.4. Estratégias de Controlo

Na transição para o modo de operação isolado, devido a falhas na rede MT ou a requisitos de manutenção, a MR está sujeita a eventuais imprevistos. Neste caso, o perfil de geração da MR pode ser modificado para reduzir o desequilíbrio entre a geração de energia e as cargas, bem como a desconexão transitória. Caso ocorram falhas, o desacoplamento entre a MR e a rede MT deve ser realizado o mais rápido possível. A transição de comutação terá impacto na dinâmica da MR. Se um *cluster* de MF é operado dentro de uma MR e a fonte

de alimentação principal (rede MT) está disponível, todos os inversores podem operar em modo PQ, porque existem referências de tensão e frequência [27]. O inversor PQ tem a função de fornecer os *set points* de potência ativa e reativa. A sua operação consiste em injetar na rede a potência disponível na sua entrada. A quantidade de potência injetada corresponde a um valor pré-especificado, definido localmente (usando um *loop* de controle local) ou centralmente através do MGCC.

Tendo em conta as tecnologias de eletrónica, a controlabilidade e as características de cada tipo de MF, apresentam-se as seguintes estratégias de controlo de uma MR [2, 27]:

- **Single Master Operation (SMO):** Nesta estratégia existe apenas um inversor VSI na topologia de rede. O inversor poderá ser ligado a uma MF com o suporte de um sistema de armazenamento de energia (*Energy Storage Systems* - ESS) ou estar afeto apenas ao ESS. As restantes MF são operadas por inversores PQ. O VSI tem como função facultar a referência de tensão e de frequência para a atuação dos inversores PQ, quando a MR se encontra em modo isolado. O MGCC deve atualizar os *set points* dos inversores PQ, obedecendo à informação recolhida pelos controladores, de forma a que a operação seja a melhor possível. Tem também a responsabilidade de eventuais deslastres de cargas necessárias e ligação de cargas prioritárias. Na Figura 9 apresenta-se o esquema de controlo SMO.



**Figura 9 - Esquema de controlo *Single Master Operation***

- Multi Master Operation (MMO):** Esta estratégia é idêntica à anterior, a diferença consiste na divisão de tarefas de controlar a tensão e frequência por duas unidades VSI. Como na estratégia SMO, as MF restantes são operadas por inversores PQ, tornando-se numa estratégia mais robusta e fiável, sendo que as MR têm mais do que uma MF controlável a disponibilizar os níveis de tensão e frequência pretendidos. Na Figura 10 apresenta-se o esquema de controlo MMO.

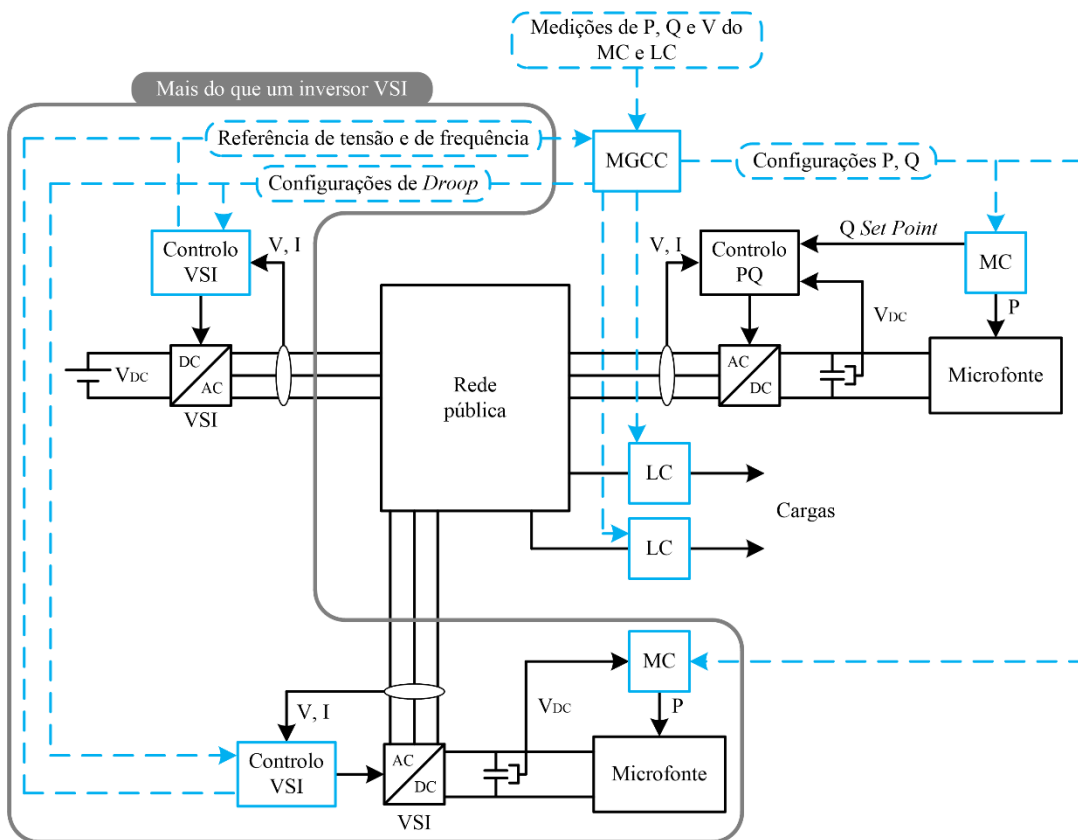


Figura 10 - Esquema de controlo *Multi Master Operation*

De notar que as estratégias referidas acima são apenas utilizadas quando a MR está no modo de operação isolado. Contudo, a capacidade de preservar o balanço energético entre produção e consumo numa MR em modo isolado obriga a inserção de um ou mais inversores VSI dependendo da estratégia utilizada (SMO ou MMO).

Neste modo de operação (isolado) os ESS devem fornecer ou absorver energia apenas nas situações transitórias. Quando o valor de frequência ou da tensão da rede estabilizar num

valor diferente do nominal (pela utilização de controladores proporcionais no *droop control* das unidades VSI, com erro em regime permanente associado), os ESS continuam a fornecer ou absorver energia durante longos intervalos de tempo. Para corrigir estes erros/desvios recorre-se a controladores PI (*proportional-integral*) em cada MF controlável (por norma utilizam-se microturbinas ou pilhas de combustível) [2].

## 2.5. Tecnologias de Geração

Como já foi referido, as MR surgiram com o aparecimento das tecnologias PD, originando a produção de energia descentralizada por parte de diversas tecnologias de microgeração. As tecnologias de MF mais utilizadas nas MR são:

- **Solar fotovoltaico** – os sistemas fotovoltaicos são um tipo de fonte de energia renovável (RES) intermitente, que converte energia solar em energia elétrica, através da excitação de eletrões nas células de silício. Os sistemas fotovoltaicos consistem em painéis fotovoltaicos que incluem um ou mais módulos compostos por células. As células fotovoltaicas podem ser associadas em paralelo (caso se pretenda aumentar a intensidade de corrente) ou em série (caso se pretenda aumentar a tensão), dependendo dos requisitos da sua aplicação. As principais vantagens e benefícios desta tecnologia são o reduzido impacto ambiental, baixos custos de operação e manutenção e uma vida útil longa. No entanto, tem como principais desvantagens a baixa eficiência das células e elevados custos fixos. Relativamente às células fotovoltaicas as duas tecnologias principais são, as células de silício monocristalinas (mono-Si) e as células de silício policristalinas (poli-Si). As células de silício monocristalinas têm maior vida útil, maior eficiência e potência com menor quantidade de espaço necessário, em comparação com as células de silício policristalinas (poli-Si). A tecnologia monocristalina também é caracterizada por ter maior tolerância ao calor em climas mais quentes, uma vez que o desempenho das células diminui com a temperatura. Os sistemas solares podem ser fixos ou móveis (seguidores solares). A grande vantagem dos sistemas móveis face aos sistemas fixos é que conseguem gerar maior quantidade de energia, necessitando da mesma quantidade de espaço. Porém, os sistemas móveis têm maiores custos devido aos sistemas de controlo e à manutenção das peças móveis associadas [28-31].

- **Microeólicas** – as turbinas eólicas convertem a energia eólica em energia elétrica através do uso da força do vento para as pás girarem e assim fazerem girar o rotor do gerador, sendo então classificada como uma RES intermitente [2, 28]. As principais partes de uma turbina eólica são a torre, o rotor e a cabina (*nacelle*). Relativamente ao eixo as turbinas eólicas podem ser classificadas de eixo horizontal ou de eixo vertical. As turbinas eólicas de eixo horizontal têm o eixo do rotor principal, o gerador, caixa de engrenagens e outros componentes no topo da sua torre. Deste modo, têm como principal característica conseguir aproveitar ventos mais fortes devido à altura da sua torre, porém a sua manutenção é dificultada. Contudo, este tipo de turbinas necessita de um mecanismo para impedir que a turbina se danifique com ventos fortes e um mecanismo para orientação das pás na direção do vento. As turbinas de eixo vertical são mais apropriadas para locais onde a direção do vento é bastante variável, no entanto, aproveitam apenas ventos de menor velocidade. Relativamente à manutenção, as tarefas são mais simples uma vez que os seus componentes se localizam perto do solo. As turbinas de eixo horizontal têm um rendimento entre os 20% e 50%, enquanto as turbinas de eixo vertical têm um rendimento entre 20% e 40% [28–30, 32].
- **Microturbinas** – as microturbinas produzem calor e eletricidade a partir de uma turbina de combustão. Os seus elementos básicos são um conjunto de compressor, turbina e gerador juntos no mesmo eixo, e para além destes possui um recuperador que aproveita o calor de exaustão para pré-aquecer o ar comprimido. As turbinas usadas para geração de energia podem ser de ciclo único ou recuperadas. Nas turbinas de ciclo único, o ar comprimido é misturado ao combustível e queimado sob condições de pressão constante, resultando num gás quente que se expande através de uma turbina. Nas turbinas recuperadas o fluxo de calor gerado é enviado para o fluxo de ar recebido, de forma a aumentar a temperatura do ar fornecido para combustão. Assim, devido ao pré-aquecimento, este tipo de turbina pode economizar até cerca de 40% do seu consumo de combustível. Relativamente ao eixo estes equipamentos podem ser classificados como turbinas de eixo único ou de eixo dividido. A diferença consiste em ter as peças rotativas (compressor, turbina e gerador) acopladas a um eixo comum ou em eixos diferentes [28, 33].

- **Pilhas de combustível (*Fuel Cells*)** – o princípio de funcionamento de uma *fuel cell* é idêntico ao de uma bateria. A eletricidade gerada por este equipamento consiste na combinação química de hidrogénio e oxigénio sem combustão. Para além de eletricidade este equipamento gera também calor e água, devido à reação química. No entanto, este equipamento também permite o armazenamento de energia, utilizando dois métodos para esse efeito. Um dos métodos consiste no processo de eletrólise para obter hidrogénio (*fuel cells* de ciclo de hidrogénio), o outro método permite reverter diretamente o processo de produção de hidrogénio e oxigénio, sem que a corrente flua na direção inversa (*fuel cells* reversíveis ou regenerativas). As *fuel cells* têm uma longa vida útil devido a ser constituída por poucas partes móveis, sendo um equipamento com baixo nível de impacto ambiental. Contudo, algumas desvantagens associadas são que o hidrogénio e o oxigénio (na forma pura) são altamente inflamáveis e os materiais eletroquímicos são caros. Outro problema associado é a sua baixa eficiência (menos de 80% para armazenamento e 50% para a regeneração). O processo de eletrólise tem grandes perdas em forma de calor devido à grande quantidade de corrente que é necessária para gerar hidrogénio suficiente [28, 34]. As principais tecnologias de *fuel cells* são: *Alkaline Fuel Cell* (AFC), *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC), *Polymer Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC), *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC) e *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC). Esta última tecnologia é a que apresenta melhor eficiência podendo atingir os 60% [28, 35].

## 2.6. Tecnologias de Armazenamento

As MR incluem na sua arquitetura dispositivos de armazenamento de energia (ESS). Deste modo, as MR têm a capacidade de funcionar em modo isolado, garantindo o equilíbrio energético pretendido. Perante um súbito desligar da rede pública, as MF e o sistema de armazenamento da MR asseguram a alimentação da respetiva instalação.

Estes dispositivos, com capacidade de absorver e fornecer energia, são muito importantes, dado que permitem assegurar continuamente o equilíbrio entre geração e consumo. Assim, nos casos em que a carga é superior à produção das MF, a existência destes sistemas evita o deslastre de cargas. Por outro lado, se uma infraestrutura destas não integrasse unidades de

armazenamento, toda a energia gerada em excesso (localmente) seria exportada para a rede pública. Assim, as microrredes (MR) incluem (além de outros recursos) tecnologias DER, tanto fontes de geração (MF) como sistemas de armazenamento (ESS).

Os equipamentos mais utilizados nos sistemas de armazenamento são:

- **Baterias** – as baterias são caracterizadas por armazenar energia química, que é convertida em energia elétrica quando existe essa necessidade. As baterias são constituídas por um eletrólito e dois eletrodos designados de cátodo (eletrodo positivo) e o ânodo (eletrodo negativo). Para aplicações que exigem grande capacidade de armazenamento de energia efetua-se a associação dos elementos necessários. Nos casos em que se pretende um determinado valor de tensão as baterias são associadas em série, no entanto, para se obter valores de intensidade de corrente superiores a associação de baterias é efetuada em paralelo, permitindo deste modo fornecer energia às respetivas cargas a alimentar. Contudo, existe a necessidade de usar controladores para evitar sobrecargas [28]. As principais tecnologias de baterias são: as baterias de iões de lítio (Li-ion); baterias de hidreto de níquel-metal (NiMH) e ácido-chumbo (Pb-A). As baterias de iões de lítio são as que apresentam, de um modo geral, melhores características pelo facto de terem uma eficiência de cerca de 85%, estas possuem uma alta densidade de energia e o seu descarregamento em vazio é reduzido [28, 34].
- **Supercondensadores** – o armazenamento de energia nos supercondensadores é feita na forma de um campo elétrico entre dois eletrodos. O princípio de funcionamento é o mesmo que os condensadores à exceção do material isolante dos condensadores convencionais que é substituído por um condutor iónico eletrolítico, no qual o movimento iónico é feito ao longo de um eletrodo condutor de grande superfície. A principal vantagem deste equipamento é a alta densidade de potência, o que permite que a energia armazenada seja fornecida rapidamente. Outra grande vantagem é a sua longa vida útil e a alta eficiência (entre 90% a 95%). No entanto, os supercondensadores têm uma baixa densidade de energia. Desde modo, estes equipamentos são mais utilizados na regulação de energia em fontes intermitentes e na compensação de energia ativa e reativa. Como principal desvantagem os supercondensadores têm uma tensão operacional máxima muito limitada, sendo



necessária a associação em série de vários elementos para atingir os valores de tensão normais em aplicações de energia [28, 35, 36].

- **Volantes de inércia (*Flywheels*)** – os *flywheels* consistem num disco rotativo (rotor) com um eixo conectado a uma máquina elétrica. O rotor do *flywheel* é suspenso em rolamentos magnéticos no interior de um compartimento a vácuo para reduzir o atrito. Este equipamento é caracterizado por armazenar energia mecânica num eixo rotativo conectado a um gerador. A energia cinética acumulada pela rotação do rotor é convertida em eletricidade. Os *flywheels* têm como principais vantagens a capacidade de fornecer uma potência de pico elevada; têm elevada eficiência (podendo atingir os 95%) em curtos intervalos de tempo; uma longa vida útil, devido ao elevado número de ciclos de carga-descarga; não necessita de muitas intervenções de manutenção e têm um reduzido impacto ambiental [34, 35]. Este tipo de equipamento é aplicado com maior frequência no transporte e qualidade de energia para facilitar a transição entre fontes de energia, fornecendo energia durante curtas interrupções de energia. Porém, também podem ser usados no suporte de energia reativa e na regulação de tensão [28, 34].



### 3. MICRORREDES DC

---

Nos últimos anos, as microrredes DC têm vindo a granjear / obter cada vez mais interesse. As microrredes DC apresentam algumas vantagens em comparação com as MR AC. As principais vantagens são: maior fiabilidade e eficiência, maior controlo e possuem uma interface mais simples com as fontes de energia renovável, cargas e sistemas de armazenamento de energia. Os sistemas modernos de energia são compostos por equipamentos que operam em modo DC, sendo aplicados em grande parte na área das telecomunicações, bem como nos sistemas de potência utilizados nos veículos elétricos. Neste contexto, são utilizadas diversas tecnologias relativas a topologias de *hardware*, em diferentes aplicações nas *smart grid* (SG) emergentes.

#### 3.1. Tipologias

Nas microrredes DC é importante ter um sistema de operação seguro em qualquer topologia utilizada. O objetivo consiste em minimizar a propagação de perturbações, detetando e isolando falhas num curto período de tempo. As topologias empregadas nas microrredes DC podem ser classificadas em três categorias [27], tais como:

- **Barramento único (*Single-Bus Topology*)** – apesar da inerente estabilidade dinâmica do sistema, a tensão no barramento comum é incontrolável. Esta topologia depende principalmente do estado da carga e da corrente da bateria, limitando a sua aplicação apenas a sistemas de barramento único. O carregamento das baterias é irregular, causando o seu desgaste acelerado. Na Figura 11 apresenta-se um esquemático de *Single-Bus Topology*.

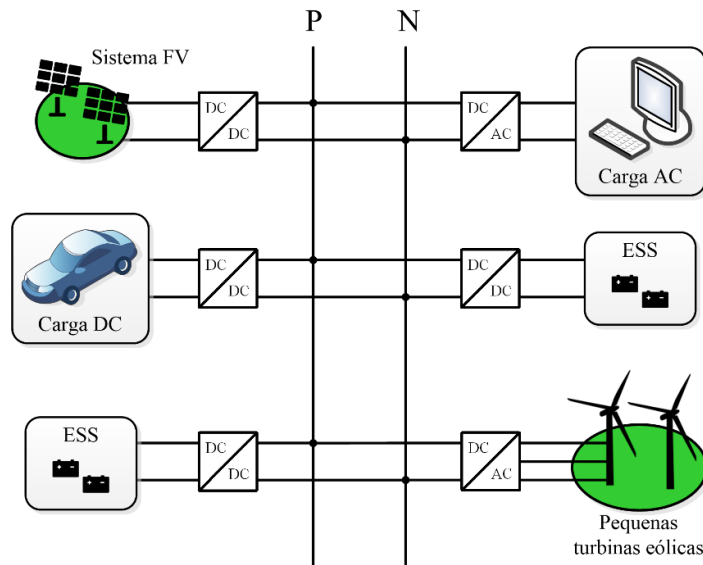


Figura 11 - Topologia de barramento único

- Múltiplos barramentos (*Multibus Topology*)** – é caracterizada por fornecer uma maior disponibilidade/continuidade de serviço e fiabilidade. As cargas são mais flexíveis de modo a possibilitar seleção do barramento desejado. O sistema tem maior eficiência, sendo que são fornecidos vários barramentos em simultâneo. Esta topologia permite configurar múltiplas MR, possibilitando a troca de energia entre si. No entanto, dependendo da configuração das MR conectadas, esta topologia possibilita que alguns barramentos possam ser automaticamente isolados do sistema em caso de falha. Na Figura 12 apresenta-se um esquemático de *Multiple bus DC*.

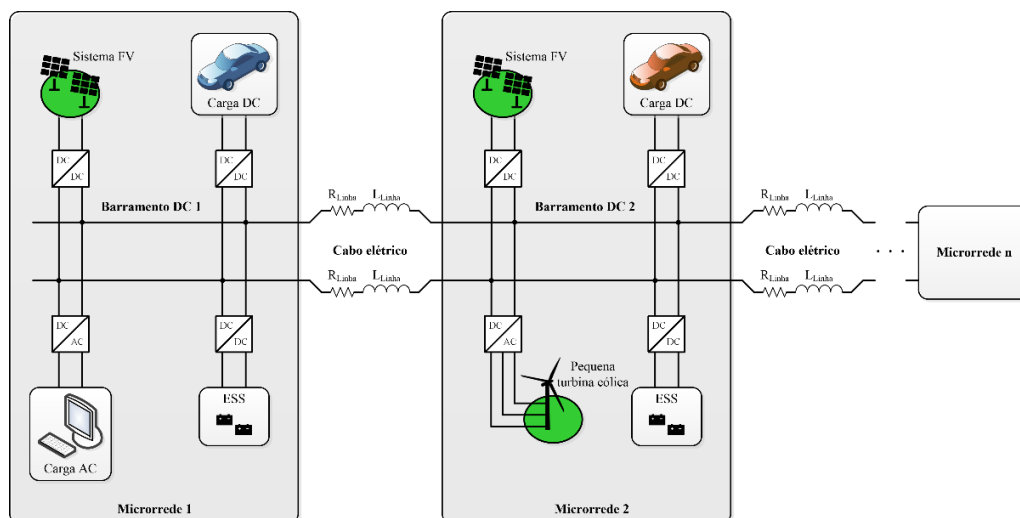


Figura 12 - Topologia de múltiplos barramentos

- **Reconfigurável (*Reconfigurable Topology*)** – esta topologia é caracterizada por ter uma maior flexibilidade durante os períodos de falhas ou manutenção periódicas de equipamentos. A arquitetura utilizada consiste num barramento em anel. Cada um dos nós da MR, bem como as ligações entre nós vizinhos são controlados por dispositivos eletrónicos inteligentes (IED). Esta topologia também apresenta uma elevada fiabilidade e uma operação redundante, sendo que a carga conectada ao barramento comum pode ser alimentada bidireccionalmente. Ou seja, em caso de falha de um dos barramentos, os interruptores são desligados e são acionados os interruptores de um outro barramento assegurando, assim, a sua operação normal. Na Figura 13 apresenta-se um esquemático de *Reconfigurable Topology*.

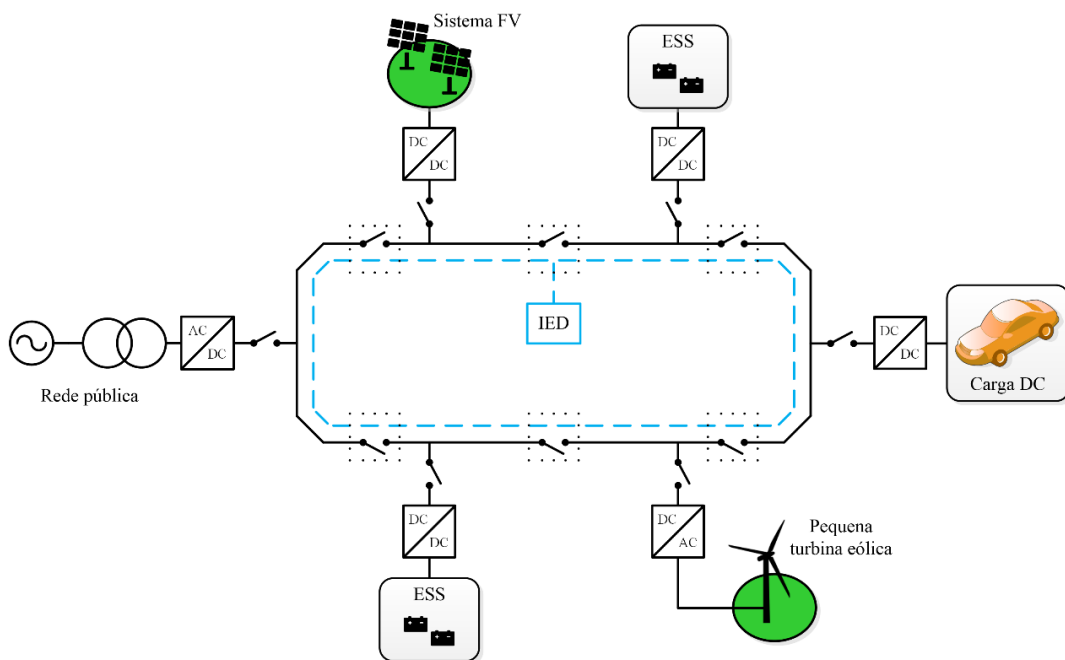


Figura 13 - Topologia de barramento reconfigurável

### 3.2. Interconexão entre Microrredes DC e Redes AC

De modo a garantir a disponibilidade e fiabilidade do sistema, as microrredes DC podem ser conectadas às redes AC através de interfaces conversoras DC-AC. A ligação DC é normalmente usada para acoplar componentes DC de forma eficiente. A interface com a rede AC é feita com base nas arquiteturas apresentadas anteriormente, sendo efetuadas por

conversores DC-AC unidirecionais ou bidirecionais. Perante uma MR híbrida, a microrrede DC pode ser regulada para receber energia da microrrede AC quando esta tem excesso de energia. Quando os requisitos de carga excedem a potência disponível a microrrede DC pode entregar a energia de volta para a rede AC.

O sistema de interconexão pode ser classificado em três categorias:

- Sistema de interconexão com um único conversor, geralmente utilizado em sistemas de pequena escala. Este sistema é aplicado por exemplo numa rede em que é constituída por tecnologia de geração eólica e fotovoltaica. Neste caso, o painel FV e a bateria formam um barramento DC, e a turbina eólica e a rede elétrica formam um barramento AC.
- Sistema de interconexão com conversores de interface paralela, geralmente usado entre os barramentos AC e DC [37].
- Sistema de interconexão com configuração agregada. Sistema em que existe uma arquitetura hierárquica de modo a agregar microrredes DC, microrredes AC e a rede de distribuição AC [5]. Basicamente, no primeiro nível são formadas as MR para integrar a geração distribuída e as unidades de armazenamento de energia. No segundo nível, cada microrrede DC é conectada a uma ligação AC por meio de inversores bidirecionais DC-AC. No nível três, várias fontes AC são agregadas para formar uma MR de modo a alcançar funções de otimização, sincronização e proteção. Cada MR formada está ligada à rede elétrica.

As microrredes DC podem ter inúmeras aplicações. Num futuro próximo, prevê-se que estas MR venham a ter uma vasta aplicação ao nível das *smart grids*. O controlo da MR deve fornecer uma operação estável, fornecer qualidade de energia suficiente no ponto de acoplamento comum (PCC). Deve também fornecer funcionalidades como a coordenação inteligente das suas unidades internas, bem como a capacidade de suporte da rede quando conectada a esta. As principais aplicações são, por exemplo: edifícios de alta eficiência (casas, lares, zonas comerciais), parques de energia renovável compostos com as mais diversas tecnologias, sistemas de armazenamento de energia híbridos (ESS). Os ESS são caracterizados por vários indicadores de desempenho, como a eficiência energética, densidade de energia, densidade de potência, ciclo de vida e taxa de auto descarga. As principais tecnologias de armazenamento são: baterias, supercondensadores, tanques de

hidrogénio/células de combustível, *flywheels* e veículos elétricos (*electric vehicles* - EV). Na Figura 14 apresenta-se um esquemático de uma microrrede DC.

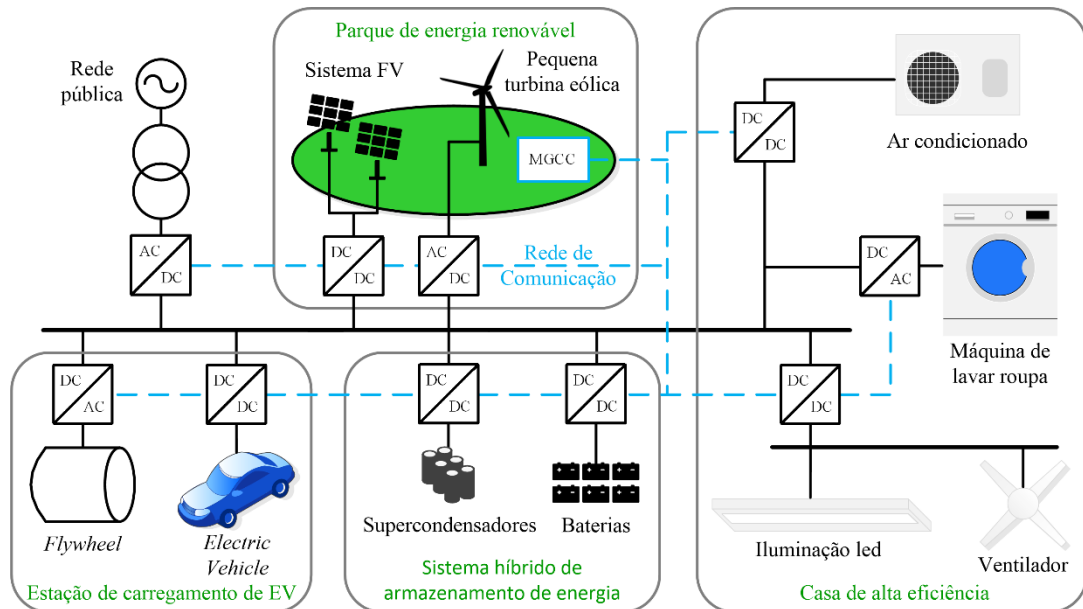


Figura 14 - Aplicações de microrredes DC

Outros fatores importantes a ter em consideração são os sistemas de terras e os problemas de proteção (tipos de defeitos existentes em microrredes DC - entre linhas e entre uma linha e a terra). Também se deve ter em conta a necessidade de se criarem regulamentos próprios padronizados [4].





## 4. MÚLTIPLAS MICRORREDES

---

O conceito de grupos de microrredes, também designado por múltiplas microrredes (MMR) ou por *cluster* de microrredes, visa a otimização conjunta dos recursos DER existentes nas MR incluídas na MMR. A abordagem de MMR proporciona maiores benefícios: custos mais baixos, redução de emissões poluentes e menores perdas na rede de distribuição. Nos grupos de microrredes (MMR), o *layout*, a tecnologia de linha e a tecnologia de interconexão, são fatores fundamentais que podem afetar potencialmente o seu desempenho.

### 4.1. Coordenação de Múltiplas Microrredes

Nos grupos de múltiplas microrredes (MMR) são utilizados dois métodos para a sua coordenação. O método centralizado e o método descentralizado [6].

O principal objetivo do método de otimização centralizado é agregar todas as entidades em um único sistema com um objetivo coletivo. O modelo de controlo centralizado de um grupo de microrredes pode efetuar a troca de energia com os seus vizinhos, tendo por objetivo maximizar o benefício de todas as microrredes. Este método requer uma comunicação completa entre todas as entidades da MMR, não sendo escalonável, não se adequa a DER *plug-and-play* tais como os veículos elétricos. Este modelo tem uma implementação simples de modo a realizar a otimização global [38-40].

O método descentralizado consiste em diminuir a complexidade operacional do modelo centralizado e melhorar a eficiência computacional. Neste caso, o modelo de otimização global é decomposto em vários subproblemas independentes, resolvidos por entidades locais. Neste método, as entidades trabalham independentemente umas das outras, pelo que não tendo informações correspondentes a outras entidades, focam-se apenas na otimização local dos recursos.

## 4.2. Arquiteturas de Múltiplas Microrredes

Em locais não eletrificados é possível construir uma infraestrutura MMR de maneira a ser o mais eficiente possível, de acordo com requisitos presentes e futuros. Neste caso, deve-se ter em conta todas as possibilidades de arquiteturas possíveis para agrupar as microrredes. Como referido anteriormente existem três conceitos principais que diferenciam a interconexão das arquiteturas, tais como:

- *Layout* – define o diagrama de como as microrredes são interconectadas;
- Tecnologia de linha – define como a eletricidade é transmitida;
- Tecnologia de interconexão – define a interconexão nos limites elétricos das microrredes. Esta pode ser efetuada por transformadores de potência convencionais ou por dispositivos eletrónicos de potência.

### 4.2.1. *Layout*

Existem três tipos de configurações básicas para a conexão das múltiplas microrredes:

- Microrredes conectadas em paralelo com a rede externa (GPCM);
- Microrredes interconectadas em série com a rede (GSIM);
- Conexão mista série-paralelo (MPSC).

Na configuração em paralelo com a rede externa (*Grid parallel connected microgrids* - GPCM), as microrredes têm apenas um ponto de acoplamento comum (PCC). Portanto, o caminho elétrico de uma MR para outra MR é executado através da rede externa, podendo a MMR fornecer serviços auxiliares à rede. O operador da rede externa tem um *Energy Management System* (EMS) que pode enviar pedidos para a MMR [6]. Quando a MMR está a operar em modo isolado, ela deve ser autossuficiente, sendo que não possui conexões elétricas externas para obter suporte. Na Figura 15, mostra-se um esquema de interligação entre uma MMR através de PCC.

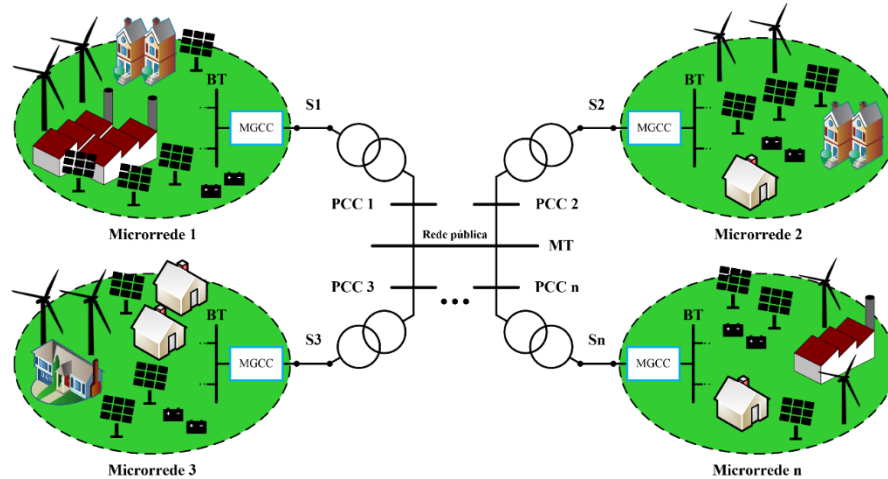


Figura 15 - Microrredes conectadas em paralelo com a rede externa (GPCM)

Quando as microrredes estão conectadas em série com a rede (*Grid series interconnected microgrids* - GSIM), formam uma MMR em que as MR estão interconectadas entre si através de uma estrutura ponto a ponto [6, 38, 39]. Como se pode observar na Figura 16, as MR podem ter mais de uma conexão externa. Na ausência de uma rede externa, a coordenação do grupo para corresponder ao equilíbrio de energia é essencial, em que o sistema MMR deve gerar a tensão e frequência (no caso de AC). No caso de ocorrer uma desconexão, o sistema pode ser dividido formando grupos menores com a mesma arquitetura. Deste modo, as MR pertencentes a um subgrupo não perdem completamente o suporte externo. Portanto, esta topologia poderá ter um melhor desempenho durante o modo de operação isolado face à configuração GPCM.

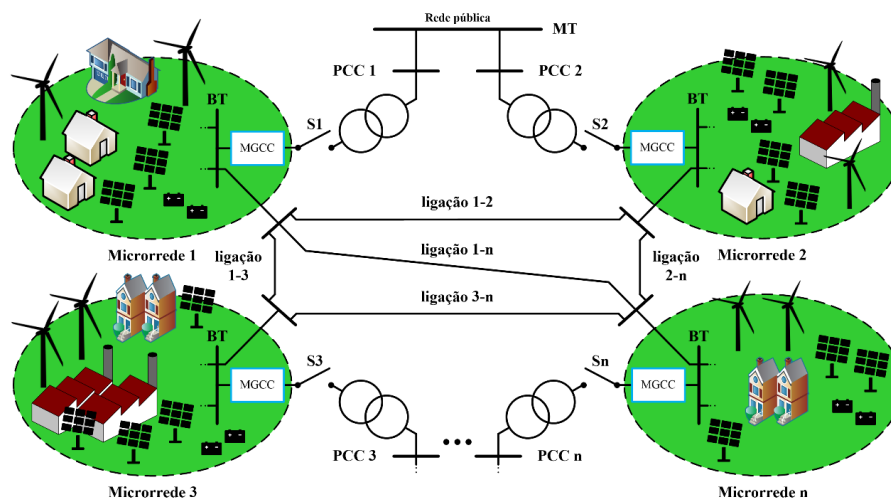


Figura 16 - Microrredes interconectadas em série com a rede (GSIM)

A conexão mista, série-paralelo (*Mixed parallel-series connection* - MPSC) consiste na combinação das duas arquiteturas descritas anteriormente (Figura 17). Nesta arquitetura, as MR podem ser conectadas diretamente à rede externa ou podem formar aglomerados de MR interconectadas em série. Cada um desses grupos tem, pelo menos, uma interconexão com a rede externa, permitindo que as microrredes tenham suporte de outras redes quando desconectadas ou quando a rede externa estiver sobrecarregada. No modo conectado à rede, podem fornecer serviços auxiliares exigidos pelo operador da rede principal/externa.

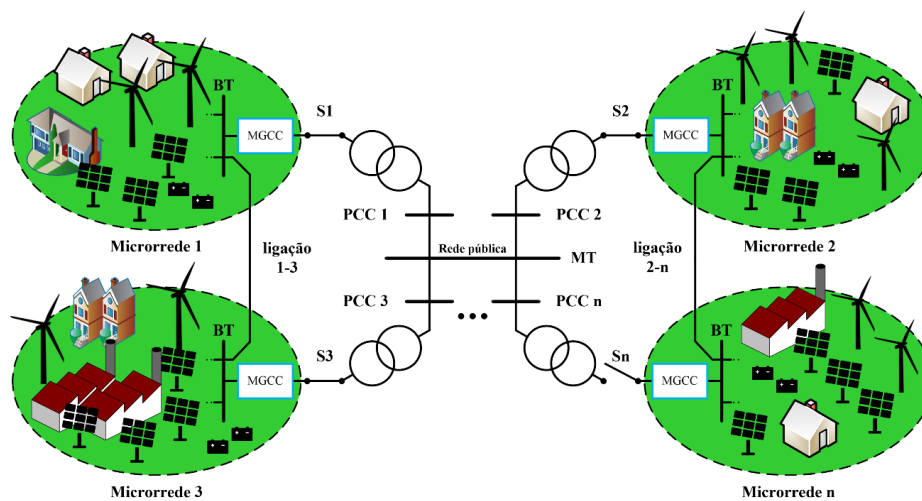


Figura 17 - Conexão mista série-paralelo (MPSC)

#### 4.2.2. Tecnologia de Linha

A tecnologia de linha pode ser DC ou AC, podendo afetar a interface de interconexão, a eficiência, a capacidade de transmissão de energia, a queda de tensão e estabilidade de tensão, a qualidade da energia, o sistema de operação e o custo total [4, 6]. As redes externas podem incorporar microrredes com arquiteturas a operar no modo DC, AC ou em DC e AC em simultâneo. Quando estamos perante uma rede AC, o sistema trifásico apresenta melhores características que os sistemas monofásicos em termos de custo, eficiência e capacidade de potência. Sendo mais adequados os sistemas trifásicos para redes externas AC. Apesar de a tecnologia AC ser a mais utilizada na transmissão/distribuição de energia, o interesse pelos sistemas de corrente contínua tem vindo a crescer, devido às perdas reduzidas e à ausência de energia reativa [5, 6]. Estas vantagens têm vindo a ser exploradas

em redes de transmissão de alta tensão (AT) para parques eólicos *offshore* [41]. As ligações entre MR podem ser em DC ou em AC monofásico ou trifásico. A escolha irá depender da tecnologia das MR a serem conectadas, bem como os requisitos dos grupos de MR em termos de custo, escalabilidade, estabilidade, entre outros fatores.

#### 4.2.3. Tecnologia de Interconexão

As arquiteturas de MMR também devem ter em consideração a tecnologia de interconexão a utilizar. A interconexão poderá ser feita por transformadores de potência ou por conversores eletrônicos de potência. Os transformadores de potência são mais apropriados quando a tecnologia de linha dos dois lados da interconexão é AC. Deste modo, o transformador fornece isolamento elétrico e uma interface robusta e fiável com um custo razoável. Mas em contrapartida não permite um nível muito alto de controlabilidade. Por outro lado, os conversores eletrônicos de potência oferecem alto nível de controlabilidade. Estes podem ser usados nas tecnologias AC e DC, tendo como principal desvantagem o seu custo e não fornecer isolamento entre redes. De modo a resolver estes problemas, é possível adotar uma combinação de conversores eletrônicos de potência e transformadores [4, 6].

Neste sentido, pode-se concluir que cada arquitetura é mais apropriada para uma dada aplicação em específico. A decisão referente à escolha da arquitetura a utilizar deve ter em consideração vários fatores, tais como: custo, escalabilidade, dispositivos de proteção, fiabilidade, segurança, estabilidade, sistema de comunicações, coordenação entre os diferentes recursos de energia distribuída (DER). Para este efeito, a escolha da arquitetura deve ser efetuada, caso a caso, tendo por base os diferentes métodos: centralizado, descentralizado ou distribuído.

No método centralizado, as informações dos DER e das cargas são coletadas a um agregador central. Posteriormente, estas informações serão processadas e os ajustes serão enviados para cada DER por meio de ligações de comunicação direta (Figura 18).

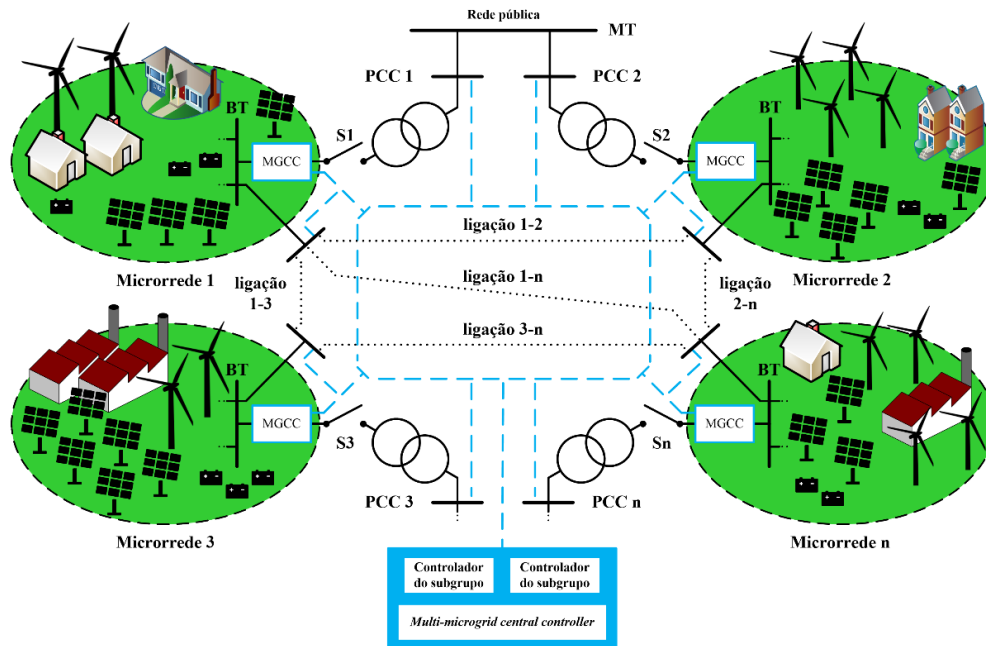


Figura 18 - Operação e controle centralizados

O método descentralizado não tem ligações de comunicação direta (Figura 19). Este método utiliza as linhas de transmissão para comunicar por meio da variação da tensão e da frequência recorrendo ao uso da tecnologia PLC (*Power Line Communication*).

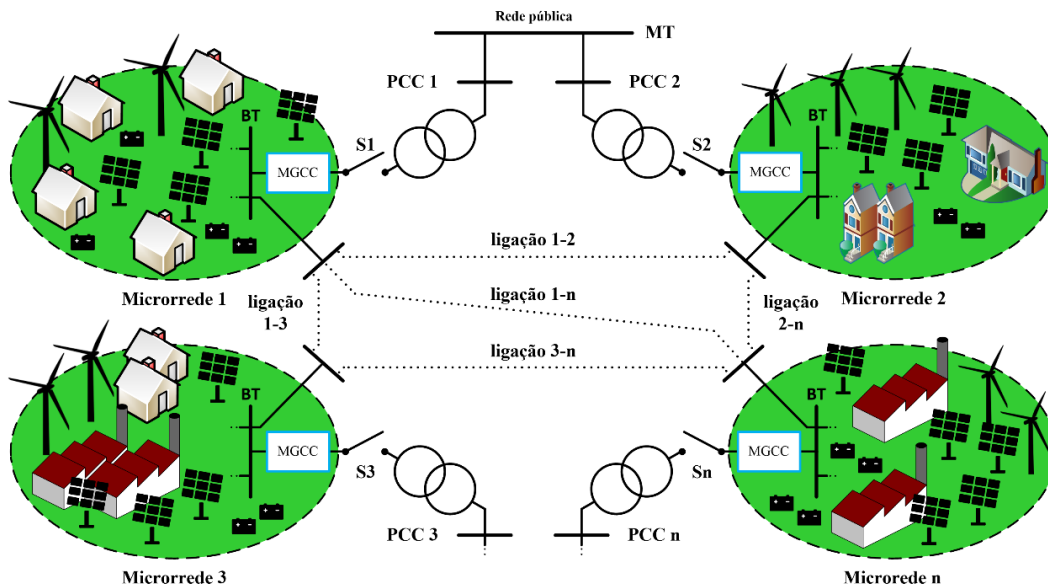


Figura 19 - Operação e controle descentralizados

Por fim, no método distribuído a comunicação é feita entre unidades através de ligações diretas de comunicação, como ilustrado na Figura 20.

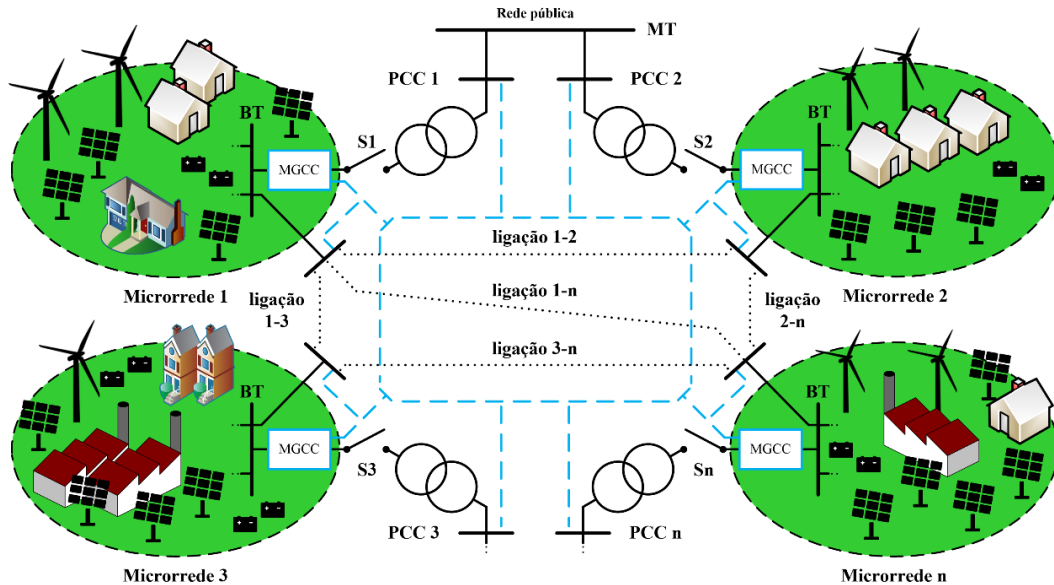


Figura 20 - Operação e controlo distribuídos

Outro fator a ter em conta nas arquiteturas de MMR é a identificação de modelos de transação de energia. Neste caso, o principal objetivo consiste em maximizar os benefícios das MR tendo em conta as diferentes arquiteturas de MMR. Neste contexto, é essencial identificar mecanismos de comercialização de energia e de serviços auxiliares, de modo a manter a rede operacional.

Em determinadas situações/regiões, o equilíbrio entre o custo e a escalabilidade determinará a melhor arquitetura de MMR. De um modo geral, pela análise das arquiteturas apresentadas acima, o *layout* GSIM não oferece vantagens significativas em comparação com o MPSC [6].

Na Tabela 2 apresenta-se uma comparação dos fatores mencionados anteriormente para cada arquitetura e tecnologia. Nesta análise, não estão incluídos modelos de negócio devido a estes poderem ser adaptados a cada arquitetura.

Tabela 2 - Comparação entre arquiteturas de múltiplas microrredes [6]

	<i>Layout</i>			<b>Tecnologia de Linha</b>		<b>Tecnologia de interconexão</b>	
	GPCM	GSIM	MPSC	AC	DC	Transformador	Conversor de energia
<b>Custo</b>	B	A	M	M	B	B	A
<b>Escalabilidade</b>	B	M	A	B	A	A	B
<b>Proteção</b>	B <sup>a</sup>	M-A <sup>a</sup>	M-A <sup>a</sup>	A <sup>b</sup>	M <sup>b</sup>	A <sup>b</sup>	B <sup>b</sup>
<b>Fiabilidade</b>	M	B	A	N/A	N/A	A	M
<b>Estabilidade</b>	M	B	A	N/A	N/A	A	M
<b>Comunicação</b>	N/A <sup>c</sup>	N/A <sup>c</sup>	N/A <sup>c</sup>	A	A	B	A
<b>Desempenho de operação</b>	N/A <sup>c</sup>	N/A <sup>c</sup>	N/A <sup>c</sup>	A	M	B	A

A - Alto; M - Médio; B - Baixo.

<sup>a</sup> - refere-se à dificuldade de proteção.

<sup>b</sup> - refere-se à aplicabilidade.

<sup>c</sup> - depende da arquitetura de controlo.

### 4.3. Unidade Híbrida de Acoplamento Comum

A crescente transformação dos sistemas de distribuição, com alta penetração de energia renovável distribuída (*distributed renewable energy* - DRE), torna a coordenação entre GD e consumo (em uma única MR) numa tarefa cada vez mais complexa, e até mesmo inviável. A interconexão de MMR, *i.e.*, *clusters* de MR, apresenta-se como uma solução viável e eficaz para a operação do sistema com a integração de GD em larga escala. Assim, de modo a contornar o problema, foi desenvolvida uma nova interface/arquitetura para MMR com os sistemas de controlo adaptados. Esta interface, denominada por unidade híbrida de acoplamento comum (*hybrid unit of common coupling* - HUCC), foi projetada em substituição ao convencional ponto de acoplamento comum (PCC). A HUCC incorpora um conversor multinível modular (MMC) e fornece interfaces AC e DC. Em [42], é apresentada uma arquitetura baseada em HUCC para várias microrredes. Nesta arquitetura as MR são conectadas à rede pública por meio de interfaces AC e interconectadas entre si por meio de interfaces DC. O estudo realizado com esta abordagem, com esquemas de controlo coordenados para diferentes cenários, mostrou (através de simulações) que as MR operavam



de forma eficaz e eficiente. Os esquemas de arquitetura e controlo utilizados melhoram a integração de DRE em larga escala, bem como o uso dos GD.

Em comparação com uma única MR, uma MMR tem a capacidade de alcançar o equilíbrio de energia através da cooperação entre todas as MR. As MMR têm como principal foco o controlo, a otimização e a gestão dos recursos existentes. Neste sentido, com base em estratégias de controlo e operação, é possível melhorar a fiabilidade e a economia do sistema. Como referido anteriormente, a arquitetura de controlo é composta por três níveis, nomeadamente o sistema de gestão de distribuição (DMS), o controlador central de gestão autónoma (CAMC) e o controlador central da microrrede (MGCC).

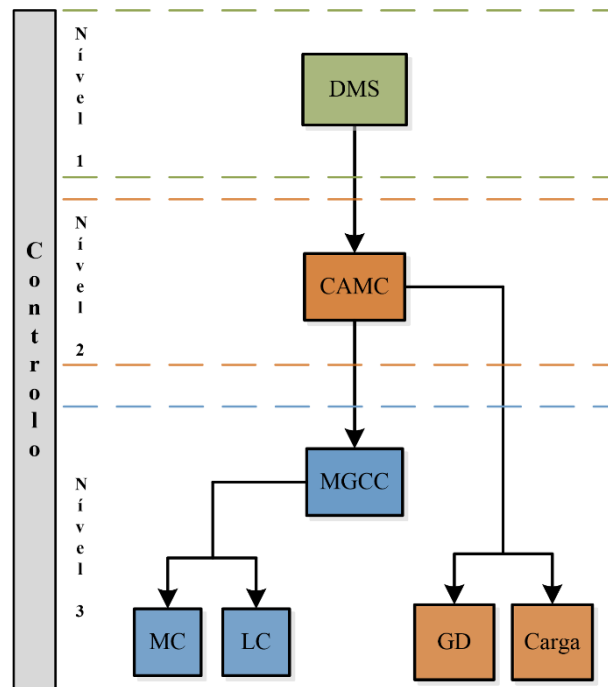


Figura 21 - Esquema de controlo hierárquico

#### 4.3.1. Arquitetura de Múltiplas Microrredes com Conexão Híbrida AC/DC

Em seguida são apresentadas duas configurações diferentes de MMR. A configuração típica de MMR, e posteriormente uma arquitetura de MMR baseada em HUCC. Assim, é possível estabelecer uma comparação das duas abordagens através das principais características de ambas.

#### 4.3.1.1. Configuração Típica de Múltiplas Microrredes

Um fator importante de uma MR é a sua capacidade de equilibrar os consumos com a geração de energia DER (GD e ESS) locais. Por norma, a capacidade de uma única microrrede é limitada. Portanto, em áreas com abundância de DRE devem ser criadas MMR de modo a contornar este problema. As MMR permitem aproveitar melhor os DRE e adquirem melhores características de operação. As MR são interconectadas por meio de linhas AC [43]. A figura seguinte apresenta uma configuração típica de múltiplas microrredes.

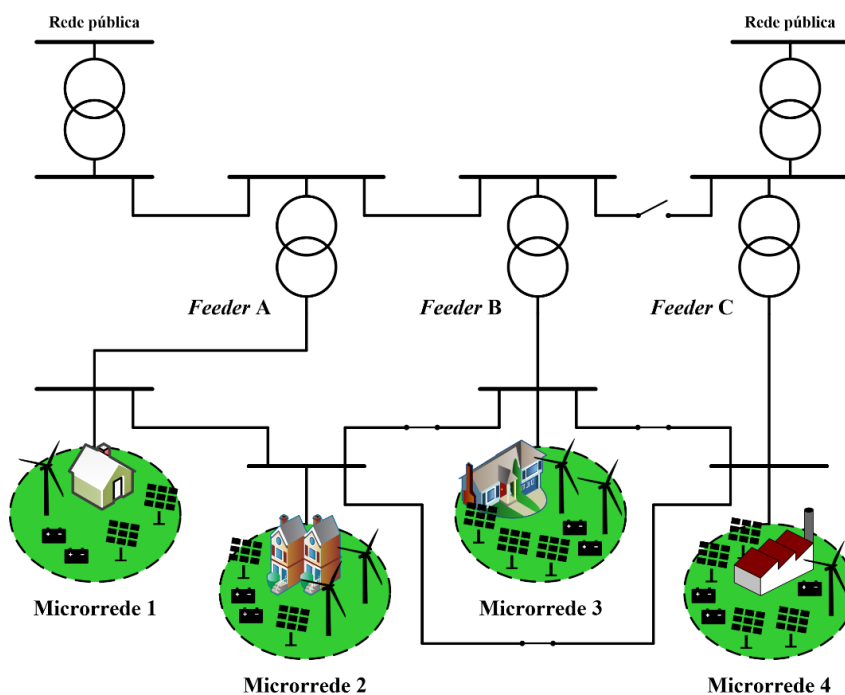


Figura 22 - Configuração típica de múltiplas microrredes

Como mostra a Figura 22, as quatro microrredes são interconectadas à rede de distribuição através de linhas AC. Relativamente aos três *feeders*, existem dois tipos de relação. O *feeder* A (em que a MR1 e a MR2 estão diretamente conectadas) e o *feeder* B (ao qual a MR3 está diretamente conectada) trocam energia com a mesma fonte. Neste caso, os *feeders* são classificados como *feeders* da mesma fonte. No entanto, a MR4 está diretamente conectada aos *feeders* A, B e C, existindo troca de energia com diferentes fontes. Estes *feeders* são referidos como *feeders* de fontes diferentes. Embora a conexão AC seja comum na organização de várias MR, esta configuração apresenta algumas deficiências para explorar o potencial das MMR.

As MMR interconectadas em modo AC apresentam as seguintes características:

- Inflexibilidade durante a alternância dos modos de operação;
- Incapacidade de controlo, originando problemas de sincronização;
- Inevitável influência eletromagnética mútua, especialmente sob falhas, devido às MR estarem acopladas.

#### 4.3.1.2. Arquitetura de MMR baseada em HUCC

A arquitetura para MMR baseada em HUCC tem como principal objetivo corrigir problemas inerentes das MMR interconectadas em modo AC. Nesta arquitetura, as MMR são interconectadas por meio de linhas DC. A conexão das MR com a rede pública é feita por meio de linhas AC. A figura seguinte apresenta uma arquitetura baseada em HUCC.

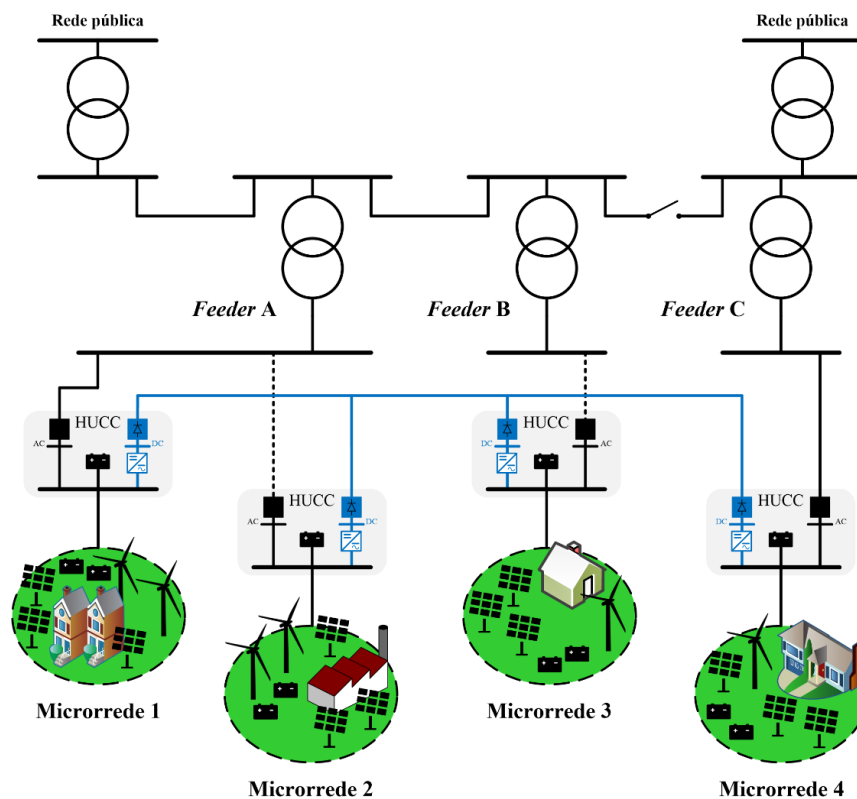


Figura 23 - Múltiplas microrredes com HUCC

Como se pode ver na Figura 23, e também anteriormente referido, a HUCC substitui o convencional ponto de acoplamento comum (PCC) utilizado em outras configurações. A HUCC fornece interfaces AC e DC por parte do seu conversor multinível modular (MMC).

O MMC é o componente principal da HUCC, onde a controlabilidade e a flexibilidade das MMR são melhoradas.

Contudo, a arquitetura baseada na HUCC deriva da configuração típica apresentada na Figura 22. Deste modo é necessário cumprir algumas regras específicas da conexão, tais como:

- Para cada *feeder* do sistema, seleciona-se (de entre todas as MR conectadas diretamente) a microrrede que tem maior capacidade de geração de energia distribuída para funcionar como MR secundária. As restantes microrredes são indicadas como MR de *backup*;
- Para *feeders* da mesma fonte, seleciona-se como MR principal a microrrede secundária que possui maior capacidade de geração de energia distribuída. No entanto, as outras MR secundárias são indicadas como MR de *backup*;
- Durante a operação normal, as MR principais têm a capacidade de fornecer conexões AC à rede pública. Contudo, as MR de *backup* estão desabilitadas, como mostram as linhas tracejadas na Figura 23. No caso de a MR principal ser incapaz de funcionar normalmente, a MR de *backup* habilitará a sua conexão AC, operando como MR principal;
- Todas as MR são conectadas entre si através das interfaces DC das HUCC;
- As linhas AC existentes são utilizadas em vez das linhas DC para conectar as MMR à rede pública. Deste modo, o custo de transformação do sistema é minimizado. Enquanto isso, a controlabilidade das MMR não é diminuída.

A arquitetura baseada em HUCC possui muitas vantagens quando comparada com as MMR interconectadas através de linhas AC. As vantagens da HUCC são:

- Interconexão assíncrona;
- Capacidade de controlo superior;
- Melhor flexibilidade operacional: várias combinações de modos de conexão e esquemas de controlo das HUCC;
- Acoplamentos eletromagnéticos reduzidos;

- Capacidade de integração de DRE melhorada: otimização na partilha de energia através de esquemas de controlo.

#### 4.3.2. Configuração Básica da HUCC

A HUCC é constituída por um núcleo de controlo e por três barramentos, sendo utilizada como interface unificada de uma MR. Os barramentos constituintes da HUCC são o barramento HUCC, o barramento AC e o barramento DC. O barramento HUCC faz a conexão entre a MR e os outros dois barramentos (AC e DC). Este barramento também tem conectado um ESS (com acesso direto ao barramento DC) de modo a facilitar a troca de energia entre as MMR. O barramento AC consiste na interface com a rede pública, já o barramento DC serve de conexão com as restantes MR. Entre o barramento HUCC e o barramento DC existe um retificador MMC. Próximo de cada barramento é instalado um disjuntor AC e um disjuntor DC respetivamente.

Os vários modos de operação da HUCC são determinados pelas diferentes combinações de estados dos *switches* e esquemas de controlo do MMC. A HUCC fornece modos de conexão simples e híbridos. No modo de conexão simples, apenas o disjuntor AC ou DC é ligado. No modo de conexão híbrida ambos os disjuntores são ligados. Atendendo às regras de conexão anteriormente descritas, a Tabela 3 apresenta os estados gerais de comutação das MMR durante o modo de operação normal e de emergência.

Tabela 3 - Estados de interruptor das múltiplas microrredes (MMR) [42]

Microrrede (MR)	Operação Normal		Operação de Emergência	
	<i>Switch AC</i>	<i>Switch DC</i>	<i>Switch AC</i>	<i>Switch DC</i>
<b>MR Principal</b>	<i>On/Off</i>	<i>On</i>	<i>Hold</i>	<i>Hold</i>
<b>MR de Backup</b>	<i>Off</i>	<i>On</i>	<i>Hold</i>	<i>Hold</i>
<b>MR Isolada (Processo de <i>black start</i> ou isolamento)</b>	<i>\</i>	<i>\</i>	<i>Off</i>	<i>Off</i>
<b>MR Isolada (Conexão ao sistema)</b>	<i>\</i>	<i>\</i>	<i>Off</i>	<i>On</i>

Como mostra a Tabela 3, o *Switch* DC está ligado na maioria dos cenários de operação, exceto no processo de *Black Start* ou de isolamento. Também é visível que no modo de operação de emergência, para o caso da MR Principal e da MR de *Backup*, o *Switch* AC e DC estão no modo *Hold*. O modo *Hold* permite bloquear/manter o estado dos respetivos *switches* de modo a que estes não sofram alterações de estado (*On/Off*), impedindo assim um acionamento ou deslastre accidental.

O MMC pode adotar vários esquemas de controlo, com o intuito de aumentar a flexibilidade operacional das MMR. Como complemento do controlo do MMC, os esquemas de controlo do ESS aumentam a controlabilidade do sistema. Geralmente, o ESS suporta a estabilidade de tensão e a troca de energia do sistema. A Tabela 4 apresenta os esquemas de controlo do MMC e do ESS.

Tabela 4 - Esquemas de controlo do MMC e do ESS [42]

Esquemas de controlo	$U_{DC}$	PQ	<i>Droop</i>		$V_f$
			P- $U_{DC}$	P-f, Q-V	
MMC	√	√	√		√
ESS		√		√	√
Microfonte		√		√	√
Objetivos de controlo	Configurar tensão DC	Saída de potência fixa	Equilíbrio e ajuste de potência		Configurar tensão e frequência

$U_{DC}$  - controlo de tensão contínua;

PQ - controlo de potência ativa e reativa;

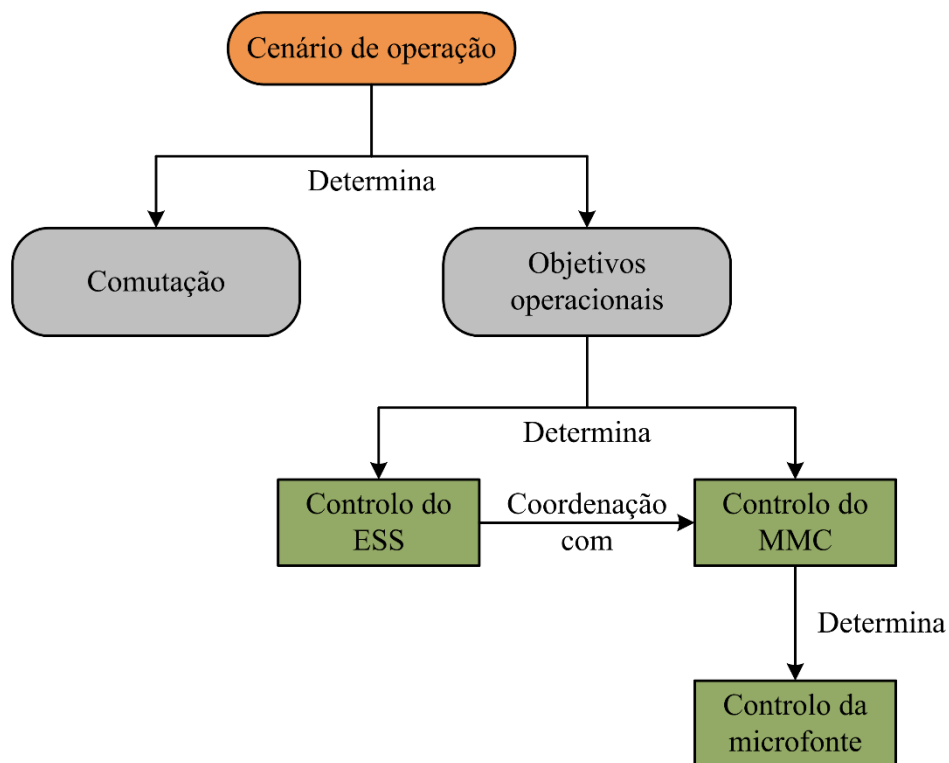
*Droop* P- $U_{DC}$  - *droop control* de tensão contínua em função da potência ativa;

*Droop* P-f, Q-V - *droop control* de frequência em função da potência ativa e tensão em função da potência reativa;

$V_f$  – controlo de tensão e frequência.

De modo a assegurar uma operação flexível das MMR, os estados dos *switches*, os esquemas de controlo do MMC e os esquemas de controlo do ESS devem ser bem coordenados. A arquitetura de rede das MMR é determinada consoante o cenário de operação. Para cada cenário específico, são escolhidos os esquemas de controlo do MMC de modo a atender aos objetivos operacionais. Os esquemas de controlo do ESS também são selecionados, sendo

coordenados com os esquemas de controlo do MMC. Relativamente às microfontes também são determinados (pelo MMC) os esquemas de controlo em cada MR. Estes esquemas de controlo devem estar em coordenação com os objetivos operacionais do sistema. A Figura 24 ilustra a relação lógica dos esquemas de controlo.



**Figura 24 - Relação lógica de controlo [42]**

As várias combinações dos esquemas de controlo podem ser aplicadas em diferentes cenários de operação: modo conectado à rede, modo isolado e no modo de emergência [42].





## 5. COOPERAÇÃO ENTRE MICRORREDES

---

A crescente procura por energia, e a diversificação das respetivas fontes, originou a necessidade de incorporar geração distribuída nos sistemas de energia elétrica. A integração de geração distribuída permite minimizar as perdas de energia e aumentar os indicadores de qualidade. Neste caso, é importante a gestão da troca de energia entre todos os participantes do sistema elétrico: produtores, consumidores e *prosumers*. Em que os *prosumers* são, simultaneamente, produtores e consumidores de energia [40, 44].

Com o aparecimento das MR e das SG (*Smart Grids*) têm surgido novos recursos associados com a procura de energia nestes sistemas. Alguns desses recursos são, por exemplo, cargas controláveis: veículos elétricos, aparelhos de ar condicionado, termoacumuladores, bombas de calor, câmaras frigoríficas, sistemas de armazenamento de energia. Este tipo de cargas permite uma acrescida flexibilidade na operação das microrredes [45]. A integração de MR nos sistemas de distribuição tem inúmeras vantagens, tais como: incremento do consumo de energia de base renovável (energia “limpa”); redução da dependência da rede principal de energia (recursos energéticos distribuídos (DER) das microrredes suportam total/parcialmente os consumos de energia locais); aumenta a fiabilidade do fornecimento de energia; diminuição das perdas nas redes de transmissão (cargas alimentadas pelos geradores locais – GD), diferimento/redução de investimentos nas redes de transmissão (em transformadores e/ou linhas de transmissão) [45, 46].

A contínua penetração de fontes de energia renovável (de pequena e média dimensão) tem estimulado a proliferação de MR. Por sua vez, o incremento de MR na mesma área de influência elétrica permite uma abordagem mais ampla, a qual consiste em considerar múltiplas microrredes (multimicrorredes, MMR). Este novo conceito consiste na associação de microrredes, ou seja, baseia-se na cooperação entre microrredes. As MMR permitem melhorar a resiliência, a estabilidade e a integração de mais recursos DER nos sistemas de energia [45].

A cooperação/coligação entre as várias microrredes de um sistema baseia-se, frequentemente, na teoria dos jogos cooperativos. Deste modo, desenvolvem-se modelos de

funcionamento de MMR, tendo por base as leis de *Kirchhoff* e, por exemplo, aspetos de índole económica [46-48].

### 5.1. Teoria dos Jogos

A teoria dos jogos pode ser dividida em dois tipos principais: não cooperativos e cooperativos. A teoria dos jogos não cooperativos utiliza-se em processos de decisão estratégica envolvendo diferentes participantes (*players*) e, geralmente, associados a fenómenos sociais em que se verifica algum tipo de conflito entre *players*. Neste caso, não é possível combinar estratégias ou fazer acordos entre *players*. Na teoria dos jogos cooperativos dois ou mais participantes formam uma aliança com o objetivo de obterem mais benefícios. Neste caso, nenhum dos participantes pode sair prejudicado. Esta abordagem pode ser usada no funcionamento de MMR. Neste contexto, o objetivo pode consistir em minimizar as perdas elétricas nas redes de distribuição. Para este efeito, a proximidade geográfica facilita o estabelecimento de estratégias cooperativas entre MR, permitindo aumentar a eficiência do sistema [44].

Nos jogos cooperativos os *players* decidem formar coligações com o objetivo de maximizar os seus benefícios. Esta teoria estuda o relacionamento/alianças em grupo de forma estabelecer decisões mais efetivas. A formação de uma cooperação deve criar condições que controlem os comportamentos dos *players*. A coordenação de estratégias numa cooperação depende do benefício total a obter, bem como da sua divisão por todos os *players* da aliança. A escolha da estratégia coletiva deve beneficiar todos os *players* envolvidos na cooperação/aliança [47]. Num jogo cooperativo, os indivíduos adquirem as informações necessárias que lhes permitem tomar as melhores decisões para formar coligações. Um jogo cooperativo tem como solução a combinação de ganhos (e perdas) de cada indivíduo. Esta solução visa maximizar um determinado objetivo comum a todos os *players*. Assim, pretende-se obter o maior benefício comum, sem prejuízo para nenhum membro da cooperação.

A teoria de jogos cooperativos baseia-se na definição  $(N, \upsilon)$ , em que  $N$  é o número total de participantes (*players*) no jogo e  $\upsilon$  é a função característica (ou o valor da aliança estabelecida) [49]. A função  $\upsilon$  determina o ganho  $\upsilon(S)$  para qualquer subconjunto não vazio

de  $N$  ( $S \subseteq N$ ), em que  $S$  é o número de *players* da cooperação. O ganho  $v(S)$  pode ser distribuído entre os membros da cooperação  $S \subseteq N$ . O valor de uma cooperação vazia (em que nenhum membro participa) é igual a zero ( $v(\emptyset) = 0$ ). As cooperações entre participantes são formadas através de fusões e divisões. No entanto, existe também o conceito de grande cooperação. Designa-se como grande cooperação, quando todos os participantes de um sistema (participantes que constituem  $N$ ) pertencem à mesma cooperação [44, 47]. Assim, nas grandes cooperações todos os *players* participam na mesma aliança, contribuindo todos para o mesmo objetivo.

No processo de cooperação é importante determinar o pagamento correspondente a cada *player* da cooperação [44]. Numa cooperação, apesar de todos os *players* terem um objetivo comum, nem todos podem colaborar de igual modo. Ou seja, há *players* com mais capacidade (mais recursos) para atingir o objetivo comum. Estes *players* têm uma influência maior no resultado e consequentemente devem ter direito a uma recompensa maior. Deste modo, para determinar o valor (justo) da recompensa, a alocar a cada *player* da cooperação, existem alguns indicadores de jogo como o valor de *Shapley*.

### 5.1.1. Valor de *Shapley*

O valor de *Shapley* consiste em determinar o balanço entre os ganhos e os custos de cada *player* pertencente à cooperação. Este método também pode ser aplicado em alianças que consistem na partilha de energia entre *players*. Deste modo, é possível contabilizar de forma justa as contribuições individuais de custo e benefício para a operação conjunta (de energia, p.ex.) [47, 48, 50]. Neste caso, o valor de *Shapley* determina o pagamento correspondente à troca de energia entre *players* da cooperação, através da divisão mútua face aos custos operacionais conjuntos [48]. Portanto, o valor de *Shapley* consiste em alocar custos de geração reduzidos no seu todo, incentivando a redução de custos de geração através da formação de alianças. Deste modo, o valor de *Shapley*,  $\varphi_i$ , correspondente a cada *player*, pode ser determinado através da seguinte expressão:

$$\varphi_i(v) = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(N-|S|-1)!}{N!} \times [v(S \cup \{i\}) - v(S)] \quad (1)$$

onde:

- $S$  – Número de *players* da cooperação
- $N$  – Número total de *players* participantes no jogo cooperativo
- $v$  – Função característica que representa o benefício conjunto da cooperação  $S$
- $i$  – *Player*  $i$  do jogo cooperativo.

O valor de *Shapley*  $\varphi_i$  é atribuído a um *player*  $i$  de acordo com uma dada função  $v$ , que determina o ganho  $v(S)$  para um jogo cooperativo  $(N, v)$ , com utilidade transferível para o conjunto de jogadores  $N$ , medido por uma função  $v$  para qualquer subconjunto não vazio de  $N$  ( $S \subseteq N$ ). As principais vantagens deste método é o equilíbrio do orçamento, bem como a garantia da existência de equilíbrio em qualquer jogo independentemente dos seus parâmetros. Assim, através do valor de *Shapley* é possível determinar, num jogo cooperativo, uma distribuição de pagamento justa, dividindo o pagamento entre os *players* que participam na cooperação. Contudo, no processo de distribuição dos pagamentos a cada um dos *players* deve-se satisfazer as seguintes propriedades [47, 48]:

1. **Eficiência:** O valor correspondente ao ganho total de uma cooperação é distribuído entre todos os participantes.

$$\sum_{i \in N} \varphi_i(v) = v(N) \quad (2)$$

2. **Simetria:** Para *players* equivalentes, *e.g.*,  $i$  e  $j$ , em que  $v(S \cup \{i\}) = v(S \cup \{j\})$ :  $S \subseteq N \wedge (S \cap \{i, j\}) = \emptyset$ . Em que  $S$  não contém  $i$  nem  $j$ , então os benefícios são equivalentes  $\varphi_i(v) = \varphi_j(v)$ .
3. **Linearidade:** Para diversas coligações  $S$ , os ganhos distribuídos  $\varphi_i(N, v)$  e  $\varphi_i(N, v^*)$  devem corresponder à soma dos ganhos de  $v$  e  $v^*$  ( $\varphi_i(N, v + v^*) = \varphi_i(N, v) + \varphi_i(N, v^*)$ ) para qualquer *player*  $i$  pertencente a  $N$  ( $\forall i \in N$ ). O jogo  $(N, v + v^*)$  é definido por  $(v + v^*)(S) = v(S) + v^*(S)$  para cada cooperação  $S$ .

4. **Jogador nulo (*zero player*):** O valor marginal desse jogador é zero para qualquer cooperação possível. Neste caso, o valor atribuído a este jogador é zero, ou seja  $v(S \cup \{i\}) = v(S) \forall S \Rightarrow \varphi_i(v) = 0$ .

Finalmente, através da expressão (1) – valor de *Shapley* – pode-se determinar a contribuição marginal média do *player i* (através das alianças que permitem obter uma grande cooperação a partir de uma cooperação vazia) [47, 50]. A regra de distribuição de custos (valor de *Shapley*) é uma das mais comuns. Esta regra garante o equilíbrio de *Nash* em qualquer jogo, e classes de jogos, como os jogos convexos, estando sempre centrado/no núcleo [50, 51]. O equilíbrio de *Nash* consiste na estratégia que mais beneficia cada um dos *players* num jogo (de dois ou mais *players*). Ou seja, conhecidas as estratégias de todos, não é possível melhorar a estratégia de cada um dos *players*. Qualquer jogo, com um determinado número de *players* e perfis de ação, tem no mínimo um equilíbrio de *Nash* [50].

## 5.2. Troca de Energia

Numa cooperação de microrredes, a troca cooperativa de energia deve ter em conta algumas condições, tais como: proximidade geográfica e capacidade DER instalada. A definição de limites geográficos tem como objetivo definir as distâncias limite associadas a trocas de energia entre MR. Deste modo, não são aconselháveis coligações com MR localizadas fora dos limites definidos. A determinação das distâncias limite pode basear-se num valor máximo permitido para as perdas da rede de distribuição (a definir por uma entidade competente) [46]. A condição relacionada com a capacidade DER instalada é muito importante, podendo variar de alguns kW a mais de 300 MW [44]. Esta condição depende dos requisitos de segurança, qualidade e fiabilidade das redes em que as MR estão ligadas.

Uma rede de distribuição pode integrar várias MR com a possibilidade de existirem trocas de energia entre elas. Cada uma das MR tem o seu próprio consumo de energia e a sua própria geração de energia, *i.e.*, é simultaneamente consumidor e produtor de energia (*prosumer*). No entanto, dependendo se tem excesso ou défice de energia, cada uma das MR tanto pode vender como pode necessitar de comprar energia [46, 52]. A necessidade de uma MR ter de comprar ou ter de vender energia é variável ao longo do tempo. A procura de energia depende da necessidade de consumo ao longo do tempo. A produção de energia nas

MR é proveniente, essencialmente, de fontes de energia renováveis (fotovoltaica e eólica), GD. A produção das GD depende das condições climáticas do local (sol e vento) em cada momento, sendo a produção de energia intermitente. Deste modo, sempre que o consumo for superior à produção local é necessário procurar (comprar) energia fora da MR. No caso de o consumo ser inferior à produção de energia, a MR poderá disponibilizar (vender) o excesso de energia às MR que estão numa situação de défice energético [44].

### 5.2.1. Processo de Troca de Energia

O processo de troca de energia numa cooperação cooperativa (o mais eficiente possível), entre duas ou mais MR, é composto por algumas etapas. Deste modo, o processo de troca de energia divide-se nas seguintes etapas [44]:

- Troca não cooperativa (é a primeira etapa do processo): Só há troca de energia entre cada MR e a respetiva Subestação. Deste modo, só há pagamentos individuais.
- Seleção de vizinhança: A rede é dividida em dois subconjuntos, designados por compradores e vendedores de energia. Nesta segunda etapa, as MR que necessitam de energia (compradores) procuram potenciais vendedores na sua vizinhança. Assim, forma-se um conjunto entre compradores e vendedores mais próximos. Consequentemente, calcula-se o pagamento correspondente ao respetivo conjunto formado.
- Formação de coligações: No processo de formação de coligações ocorrem fusões e sucessivas divisões de alianças entre MR integradas na rede. A fusão de coligações surge com base em incentivos que melhoram os benefícios das várias MR (coligações apenas entre MR vizinhas). A divisão de coligações pode ser explicada através da Ordem de *Pareto*. Num processo de cooperação (fusão ou divisão), a Ordem de *Pareto* define que os *players* tomem as suas decisões de forma a terem o maior benefício possível. No entanto, a maximização do benefício de um *player* não pode prejudicar outro *player* da cooperação, *i.e.*, não diminuir os benefícios deste [46, 50, 53].
- Transferência de energia: Finalmente, através da Ordem de *Pareto*, seleciona-se a cooperação que maximiza os benefícios globais. Deste modo, efetua-se a troca de

energia entre todos os *players* (compradores, vendedores). Por último, a troca de energia entre *players* da cooperação (MR, e Subestação se integrar a cooperação) origina o pagamento a cada um dos *players*.

De acordo com o estudo realizado em [44], os parâmetros técnicos a ter em conta para determinar as distâncias limite de forma a tornar uma cooperação mais eficiente são: a percentagem máxima de perdas na linha de distribuição ou transmissão de energia; o nível de tensão da linha; a resistência total da linha e a secção (e tipo) de condutor que estabelece a resistência quilométrica da linha. Os autores deste estudo concluíram que, através da cooperação (troca de energia) entre MR, tendo em conta a proximidade geográfica, os preços da energia diminuíram significativamente (em alguns casos na ordem dos 50%), bem como as perdas na rede.

### **5.3. Colaboração na Troca de Energia**

Na colaboração entre MR, para a troca de energia, deve-se ter em conta algumas questões inter-relacionadas, tais como: a operação conjunta, a alocação de custos e o cálculo dos pagamentos.

#### **5.3.1. Operação Conjunta**

Um dos problemas da operação conjunta consiste no fornecimento de energia associado a agendamentos de cargas agregadas envolvendo MMR [46]. Este problema tem sido abordado no caso de concessionárias verticalmente integradas (controlo de operações a montante ou a jusante) em mercados de energia regulados. Por norma, de forma a contornar este problema, as concessionárias formam coligações, *e.g.*, na forma de *pools* de energia. Deste modo, com base numa abordagem técnico-económica, obtém-se o despacho conjunto dos recursos de geração [48].

Outro problema (da operação conjunta) consiste na afetação dos benefícios provenientes da troca de energia entre uma MR e o sistema de energia. A participação de DER na comercialização de energia contribui para que as redes elétricas obtenham benefícios. Neste

sentido, os ganhos obtidos pelas redes podem ser partilhados de forma cooperativa [44, 46]. Este processo baseia-se no conceito de economia de escala, *i.e.*, máxima utilização dos recursos disponíveis com baixos custos de produção e incremento de bens e serviços [48].

Asimakopoulou *et al.* [54] apresenta dois modelos de decisão para a interação entre a concessionária e a microrrede. No primeiro modelo, modelo descentralizado, é abordado o caso de acordos bilaterais entre ambas as partes. O fornecedor de serviços de energia seleciona as fontes a serem despachadas para alimentar a carga, de modo a otimizar custos. As opções consistem em (i) reduzir parte da carga, (ii) fornecer energia produzida através das unidades de produção locais ou (iii) utilizar rede elétrica a montante (unidade central de produção). Para este efeito, a decisão é tomada com base no custo de cada recurso. Como a unidade central de produção é operada por uma entidade diferente, a margem de lucro desta entidade tem impacto sobre a decisão do fornecedor de serviços de energia. No segundo modelo a unidade central de produção (rede principal) e a MR são geridos pela mesma entidade (modelo centralizado), sendo eliminado o parâmetro de margem de lucro.

Em [55] é abordado, de forma geral, os conceitos de comercialização de energia distribuída para microrredes. São abordados modelos teóricos de jogos para a tomada de decisão de vários agentes, como: mecanismos de leilão; jogo de *Stackelberg* (consiste no comportamento entre dois agentes, sendo um o líder e o outro o seguidor); teoria de jogos não cooperativos (em que nenhum jogador tem incentivo em alterar a sua estratégia - equilíbrio de *Nash*). Em [55] também é abordada a solução centralizada. Neste caso, os agentes atuam como uma única entidade, ou seguem as indicações de um controlador central que tem as informações dos compradores e vendedores. Nesta abordagem pode ser utilizada a transação de energia *peer-to-peer*. Nestes problemas são utilizadas ferramentas de otimização, geralmente, para minimizar a geração total de energia e o custo de transporte [56].

A gestão da troca de energia entre a concessionária e a MR é otimizada de forma cooperativa, de modo a maximizar a economia total das redes elétricas. Nesta abordagem é sugerida uma estrutura de decisão centralizada para resolver a interação entre redes elétricas. Assim, resolve-se um único problema de otimização, que corresponde a maximizar os recursos de geração disponíveis [48].



### 5.3.2. Controlo Cooperativo

Nas redes elétricas tradicionais, existe uma taxa de utilização que indica o valor da potência que cada GD pode fornecer à rede. No entanto, as ligações de comunicações existentes podem ter largura de banda limitada e ser intermitentes e assíncronas. Assim, é necessário ter um sistema de controlo adequado, com capacidade de responder às mudanças da rede de distribuição (que pode ter diferentes topologias) [57, 58].

Na operação conjunta entre várias entidades (*e.g.*, MMR e a rede principal) também se pode utilizar esse indicador através do controlo cooperativo, permitindo obter um melhor desempenho de operação [57]. A introdução das taxas de utilização deve permitir determinar (de forma justa) as potências ativa e reativa que cada GD deve injetar na rede. No controlo cooperativo, as taxas de utilização são fornecidas pelo operador da rede através dos meios de comunicação disponíveis. Neste caso, os problemas referidos nas ligações das comunicações não são impeditivos, dado que os agentes envolvidos praticam comportamentos cooperativos. Assim, o sistema funciona como um grupo único [57].

A interação entre as MR e a rede principal pode ser formulada como um jogo de *Stackelberg*. Ou seja, a rede principal (líder), oferece um preço de energia adequado às MR (seguidores), minimizando o seu custo e assegurando o fornecimento de energia que as MR estão dispostas a despachar. A aplicação desta abordagem tem como vantagem a otimização do fluxo de potência das MR para a rede principal (máximo benefício) [57].

Em [58], os autores de apresentam um algoritmo de controlo distribuído para regular a potência de múltiplos sistemas FV ligados a uma rede de distribuição. Nesta abordagem, a rede de comunicação das unidades FV é simplificada. Assim, o sistema de controlo recebe apenas informações assíncronas intermitentes de geradores FV vizinhos. Os autores referem que as redes de comunicação podem variar de topologia ao longo do tempo, com largura de banda mínima e que mesmo assim os geradores FV se auto-organizam. Adicionalmente, é referido que o controlo proposto permite a rede de distribuição ajustar-se autonomamente (operando de forma viável) e o grupo de geradores FV convergir para um perfil pré-determinado.

Os sistemas de controlo cooperativo permitem a auto-organização em grandes escalas e a diminuição de comunicações. O controlo cooperativo permite que (i) as unidades de GD não

tenham de reduzir a sua geração, (ii) o controlo de tensão e (iii) partilha de energia durante o modo conectado à rede (com fluxo de potência reativa reduzido). No modo isolado, o controlo cooperativo permite regular a frequência e a tensão das várias microrredes [59]. Na cooperação entre entidades (MR/rede principal) existe constantemente flutuação de potência ativa no ponto de acoplamento comum (PCC), devido à intermitência das fontes de energia renovável e das oscilações de carga. Para restringir esta flutuação de energia pode ser usado um método de controlo distribuído para regular a carga e descarga de múltiplas unidades de armazenamento de energia (*energy storage unit* - ESU). Este método de diminuição da flutuação propõe que todas as unidades de armazenamento operem no mesmo estado de carga (SoC) e relação de potência (RoP), para que a degradação das unidades não seja desigual [60]. O controlo distribuído permite lidar com o problema de ligação e desconexão das unidades de armazenamento, tendo assim melhor adaptabilidade e escalabilidade. Deste modo, é possível economizar custos de comunicação e redução de carga computacional no controlo entre microrredes. Contudo, para estimar estados desconhecidos em redes de comunicação com perdas, são frequentemente usados filtros de *Kalman* [61]. Esta abordagem permite também que as unidades de geração renovável operem no modo de potência máxima, uma vez que as ESU permitem atenuar a flutuação de potência. Para garantir a alimentação constante por parte das ESU, o operador das microrredes precisa de controlar o SoC para evitar o seu esgotamento ou saturação [59, 60].

### 5.3.3. Alocação de Custos

Na troca de energia colaborativa é aplicada a regra de distribuição de custos. A cooperação das diversas entidades (ligadas na mesma zona da rede elétrica) operam como uma única unidade e, assim, apenas existe um diagrama de cargas agregado. Neste caso, os potenciais benefícios devem ser partilhados de forma justa, podendo basear-se na teoria económica de custos. O desenvolvimento de critérios e métodos para problemas de alocação de custos surgiu com a teoria de jogos de partilha de custos [51]. Os jogos de partilhas de custos permitem a alocação de custos para os membros de uma determinada aliança que pretende dividir o custo de operação conjunta. Na existência de membros que não cooperem com outros membros será atribuído um custo independente. Do mesmo modo, um subgrupo terá um custo partilhado se os membros cooperarem uns com os outros, porém, não terão custo

partilhado com os restantes membros. Existem vários métodos para abordar o problema de alocação de custos, de forma a determinar o custo conjunto e a divisão do excedente. No entanto, o valor de *Shapley* é o método mais utilizado, que permite os participantes de uma cooperação avaliarem, à priori, os seus benefícios na participação de uma cooperação [48, 51]. O valor de *Shapley* é um método que permite alocar custos de uma cooperação, fornecendo um orçamento equilibrado em qualquer aliança independente dos seus parâmetros [48]. Este método tem várias aplicações no mercado de energia como, por exemplo, alocar custos de emissões ou custos de expansão de transmissão de maneira justa. No entanto, o método de alocação de custos também pode ser baseado em *Nucleolus* (pequeno núcleo) derivado da teoria dos jogos cooperativos, permitindo obter um custo partilhado (justo) entre os membros de uma cooperação, bem como melhorar o benefício económico local [45].

#### 5.3.4. Modelos de Custo

Numa cooperação, os recursos de geração de cada subsistema são determinantes para a tomada de decisão entre a operação independente e a operação conjunta (garantia de geração de energia suficiente para alimentar as cargas) [48]. No entanto, para além da garantia de geração de energia suficiente, é também necessário a tomada de decisões de forma a minimizar os custos individuais. Portanto, as microrredes podem operar entre si ou com a rede principal, como sistemas de energia interconectados com o objetivo de minimizar os custos individuais de geração (num período de tempo, *e.g.*, diário, semanal) através da troca de energia [45, 48]. No entanto, cada caso é um caso particular, uma vez que para minimizar custos devem ser considerados alguns fatores (já referidos anteriormente). De entre estes, os principais fatores são: o limite de distância que torna a operação conjunta viável e o balanço entre geração e consumo [45, 48, 62]. Deste modo, deve-se adotar um modelo de custo que tenha em conta a operação do sistema nos diferentes cenários possíveis. Uma boa abordagem para a minimização de custos deve considerar os custos individuais (das microrredes e da concessionária), *i.e.*, os custos de geração autónoma, sem troca de energia, e os custos de geração conjunta, com troca de energia entre entidades.

#### 5.3.4.1. Modelo de Custo de Geração Individual

Os custos de geração individual em operações independentes podem ser calculados com base (i) nas configurações fixas de cada sistema (microrrede ou concessionária) ou (ii) através das suas variáveis de entrada determinísticas, considerando perfis de carga e restrições de geração individuais [45, 48]. Numa MR com configuração fixa de geração distribuída (fontes de energia renovável e sistema de armazenamento de energia), o custo mínimo para alimentar as suas cargas, pode ser formulado como um problema de programação inteira mista através do compromisso de unidade (*unit commitment* - UC) e o despacho económico (*economic dispatch* - ED) [48]. O custo de geração da concessionária pode ser calculado considerando a concessionária como uma unidade de geração agregada, em que a função de custo de geração (horária, diária) é obtida com base na resolução do problema UC e ED sobre diferentes níveis de carga [45, 48, 62].

#### 5.3.4.2. Modelo de Custo da Microrrede

A produção de energia de uma MR depende da capacidade de geração instalada, como o fornecimento de energia renovável (*e.g.*, solar, eólica), recursos de energia distribuídos não renováveis (*e.g.*, turbinas a gás), de modo a alimentar as cargas. No modelo de custo das MR, as fontes de energia renovável são definidas com custos marginais nulos de forma a garantir que a geração renovável seja despachada na totalidade [48]. O fornecimento de energia às cargas deve estar sempre disponível num sistema de energia. Assim, deve existir um equilíbrio entre a procura de energia (consumo) e o fornecimento (produção), que deve ser garantido através da geração suficiente de energia. No entanto, deve ser considerado um nível mínimo e um máximo de potência por parte das unidades GD [48, 62].

A utilização de sistemas de armazenamento visa armazenar o excesso de energia renovável e reduzir a geração distribuída não renovável. Quando a produção de energia renovável excede a capacidade do sistema de armazenamento toda a energia excedente será perdida, caso não seja vendida à rede principal. O uso destes sistemas não afeta diretamente a função objetivo. Contudo, o armazenamento de energia acrescenta restrições específicas associadas aos fluxos de energia: carga e descarga do sistema de armazenamento. Portanto, para o armazenamento de energia deve ser considerado o balanço de energia por um período de

tempo, tendo em conta a sua eficiência. A potência instantânea de saída do sistema de armazenamento é dada pela diferença entre a potência total descarregada e a potência total carregada. Deste modo, a energia total fornecida pelas unidades de geração e do sistema de armazenamento deve ser superior à diferença entre a procura de energia e a geração de energia renovável fornecida pela microrrede [48]. Como nas unidades de geração distribuída, nos sistemas de armazenamento também devem ser considerados os limites de energia (taxas de carregamento) e os limites de armazenamento (capacidade das baterias).

Após determinar a produção de energia renovável, a potência necessária gerada pela restante geração distribuída pode ser determinada para cada nível de carga [48, 62]. Desta forma, é possível alimentar as devidas cargas através dos restantes recursos distribuídos, quando as energias renováveis e os sistemas de armazenamento são insuficientes. Os modelos de custo das microrredes devem determinar as unidades de geração a serem despachadas (UC) e determinar o valor ótimo de produção (com o menor custo possível e com elevada fiabilidade) de cada gerador pertencente ao sistema (ED) [45, 48, 63].

#### **5.3.4.3. Modelo de Custo da Concessionária**

O custo de geração da concessionária pode ser calculado considerando o sistema como uma unidade de geração agregada. As configurações fixas, as variáveis de entrada determinísticas – restrições de geração individuais e perfis de carga – são fatores importantes para determinar o custo de operação da concessionária. Como nas microrredes, também se deve ter em conta o nível mínimo e máximo de potência fornecido pelas unidades geradoras agregadas. A função de custo de geração é obtida com base na resolução do problema UC e ED sobre os diferentes níveis de carga [48]. De forma a minimizar os custos de geração da concessionária deve-se agregar todas as unidades térmicas disponíveis na rede em uma unidade térmica comum. Deste modo, o UC e o ED são efetuados sobre o conjunto de todas as unidades térmicas disponíveis, minimizando o custo de geração para cada nível de carga a alimentar.

#### 5.3.4.4. Modelo de Custo de Geração Conjunta

O modelo de cooperação entre duas entidades de energia (troca de energia entre microrredes, MMR, ou entre microrrede e concessionária) permite minimizar de forma cooperativa os custos totais de geração [45]. Como anteriormente referido, neste processo de operação conjunta é comum adotar o conceito de valor de *Shapley* para determinar as contribuições de cada entidade para a economia de custos [48]. O processo final consiste em decidir quem deve pagar a quem, e a que preço, de forma a compensar a troca de energia.

No modelo de custo de geração conjunta as entidades (microrredes e concessionárias), cada uma com a sua geração e cargas distribuídas, operam como um sistema de energia interconectado em que a geração é despachada centralmente, ou seja, como uma única entidade. Nesta situação, existe um coordenador de mercado centralizado com informações sobre as funções de custo de todas as unidades de geração. O coordenador de mercado tem como responsabilidade despachar todos os recursos de geração disponíveis e minimizar o custo de geração conjunta a partir da entrega do cronograma de carga agregada [45, 48].

O custo de geração conjunta pode ser determinado através da soma da função de custo da concessionária agregada com os custos de geração da microrrede. Na operação conjunta, as cargas em ambos os sistemas devem estar equilibradas e a geração de energia deve ser suficiente. Deste modo é possível apresentar um cronograma de operação conjunta para um determinado período de tempo. Como no modelo de custo das MR, a geração renovável é assumida como totalmente despachada, com custos marginais nulos. Deve também ser considerado os limites mínimos e máximos de potência para unidades de geração distribuída, bem como para a concessionária [45]. Quanto ao armazenamento, as restrições são as mesmas do modelo de custo da MR. No entanto, na condição final deve-se ter em conta a energia fornecida pela concessionária e as cargas acopladas à mesma. Deste modo, a energia total fornecida pelas unidades de geração, pela concessionária e pelo sistema de armazenamento deve ser superior à diferença entre a procura de energia (por parte da MR e da concessionária) e a geração de energia renovável fornecida [48].

Em [48], Pilling *et al.* recorreram ao CPLEX para implementarem o modelo de decisão proposto. Este modelo consiste num problema de programação quadrática inteira mista (*mixed-integer quadratic programming*, MIQP). As funções de custo integram termos de

segunda ordem para despachar todos os recursos de geração disponíveis e minimizar o custo de geração conjunta através da entrega do cronograma de carga agregada.

### **5.3.5. Cálculo de Pagamento**

O cálculo de pagamento da troca de energia pode ser efetuado com base na alocação (justa) de custos de geração conjunta, aplicando o conceito de valor de *Shapley*. Deste modo é possível calcular os pagamentos (justos) para transações de energia através da diferença entre os valores de *Shapley* e o custo real de geração de cada rede operando conjuntamente [48]. O valor de *Shapley* incentiva a otimização do custo conjunto, compensando através dos pagamentos (justos) a troca de energia entre sistemas (concessionária e a microrrede ou entre microrredes).





## 6. COMÉRCIO DE ENERGIA

---

Cada vez mais, a geração de energia é proveniente de fontes de energia renováveis (recursos de energia distribuídos) [64]. A coordenação dos recursos energéticos distribuídos e a reorganização dos sistemas energéticos locais pode ser realizada, de forma eficiente, através de sistemas de energia comunitários integrados (ICES). Os ICES têm como função garantir os requisitos de energia das comunidades, permitir trocas de energia e fornecer serviços à rede principal/pública. Este sistema permite integrar de forma eficaz os recursos energéticos locais, como unidades de cogeração de alta eficiência, unidades de geração renovável e unidades de armazenamento. No entanto, a participação de ICES nos mercados grossistas pode originar dois tipos de incerteza: a produção de energia através dos recursos energéticos renováveis e a definição dos preços de mercado [65]. A integração dos ICES (nos sistemas energéticos atuais) apresenta vários desafios devido à intermitência da sua geração de base renovável [64, 66]. Em consequência desta intermitência, é cada vez mais complexo garantir um balanço fiável entre a geração e consumo de energia. Porém, estes problemas de fiabilidade têm forçado as MR a comprar energia à rede pública [66]. Para enfrentar estes desafios tem sido investigada a adoção da comercialização de energia *Peer-to-Peer* (P2P) nos mercados de energia de MR [40, 64, 67]. Esta abordagem permite manter os lucros associados ao comércio de energia dentro de uma comunidade. Consequentemente, estes mecanismos proporcionam incentivos (financeiros e socioeconómicos) para o investimento na integração e expansão de energias renováveis locais [64, 68]. Os mercados de energia de MR possibilitam que os participantes de pequena escala (consumidores e *prosumers*) comercializem energia ao nível da sua comunidade, praticamente em tempo real. Esta característica local simplifica o equilíbrio sustentável e fiável de geração e consumo de energia. No entanto, para uma operação eficiente nos mercados de MR são necessários sistemas de tecnologias da informação e comunicação (*information and communication technologies* - ICT) inovadores, seguros e inteligentes [69, 70]. Deste modo, é possível uma integração amigável e abrangente dos participantes no mercado, essencial para o sucesso da sua operação conjunta [64, 69].

O comércio de energia entre MR é uma forte solução para diminuir a compra de energia proveniente dos tradicionais geradores de energia (poluentes) das redes públicas [66]. Atualmente, a eletricidade consumida ainda é fornecida em grande parte pelas concessionárias públicas de energia através de sistemas centralizados e com preços de eletricidade regulados. Esta metodologia tem-se tornado ineficiente e insustentável, uma vez que grandes quantidades de energia são perdidas em forma de calor nas grandes centrais produtoras [64, 71]. As linhas de transmissão de longas distâncias, existentes nos sistemas centralizados, também contribuem para perdas de energia significativas, aumentando o preço de eletricidade para os consumidores finais. Os sistemas centralizados também apresentam maiores vulnerabilidades da rede. A ocorrência de falhas nestes sistemas (*e.g.*, tempestades, ataques à segurança da rede) atinge, geralmente, áreas de grandes dimensões, revelando enormes dificuldades de resiliência. Apesar dos avanços nas tecnologias renováveis (principalmente nas células solares e no armazenamento de energia em baterias, que contribui para o aumento de energia renovável produzida localmente), as concessionárias recebem o excesso de energia produzida ao preço do mercado grossista. Contudo, com a forte produção de energia distribuída localmente, um consumidor poderá não pagar a eletricidade ao preço de mercado. Neste caso, definido um mecanismo cooperativo, os consumidores poderão ser alimentados a partir de fontes de energia locais a preços inferiores [71].

As atuais redes de distribuição de energia não estão completamente preparadas para a implementação do comércio de energia P2P. Uma possível solução para este problema é a implementação de redes de distribuição de energia dedicadas à comercialização P2P. Esta solução tem como principal foco de aplicação os locais isolados das redes de energia atuais [66]. Por outro lado, a regulamentação atual da maioria dos países ainda não permite a comercialização local de energia *Peer-to-Peer* [64].

### **6.1. Conceito *Peer-to-Peer***

O conceito *Peer-to-Peer* (P2P) consiste num tipo de rede em que os seus elementos (participantes) estão diretamente conectados uns com os outros (Figura 25). Cada um destes elementos representa um nó da rede [68]. Assim, neste tipo de rede, cada elemento funciona

como cliente, bem como fornecedor (servidor). É um tipo de rede descentralizada, que permite aos seus elementos partilhar recursos sem terem de recorrer a um intermediário, oferecendo assim enormes benefícios em termos de segurança [68, 72]. A sua aplicação pode ser em diversas áreas, como em redes de computadores, bem como em sistemas de energia [64, 66, 68]. Atualmente, o tipo de rede P2P tem sido alvo de investigação, mostrando maiores benefícios quando comparado com o tipo de rede *Peer-to-Grid* (P2G) convencional [40, 73].

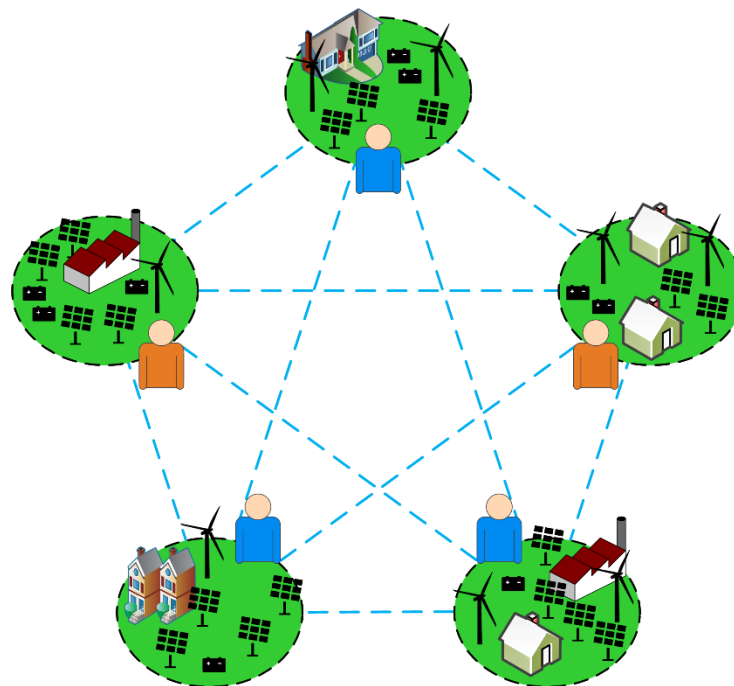


Figura 25 - Conexão *peer-to-peer*

### 6.1.1. Comércio *Peer-to-Peer*

A integração eficiente de RES e a reestruturação dos sistemas de energia com base em grupos de MR (MMR) permitem melhorar a fiabilidade e a sustentabilidade ambiental do setor e, simultaneamente, proporcionar benefícios económicos [40, 64]. O comércio de energia, na operação de MMR em modo isolado, pode ser realizado através da troca de energia entre MR recorrendo à topologia de rede P2P. Neste caso, as transações de energia numa MMR utiliza uma abordagem descentralizada [64, 66]. A abordagem descentralizada consiste em geradores de energia de pequena escala, instalados nos locais de consumo, para servirem um

pequeno número de utilizadores [64]. Nesta abordagem, cada MR resolve o seu problema de otimização local, tendo a possibilidade de trocar algumas informações com as restantes MR da rede. Na topologia P2P as transações entre MR são efetuadas de forma direta, sem a existência de intermediários [64, 66, 70]. Em [74] é apresentada uma plataforma de mercado flexível, que permite a coordenação eficiente de fornecedores, *prosumers* e consumidores de energia. A operação conjunta das MR em modo isolado fornece vários benefícios. Estes benefícios consistem no aumento de fontes de energia renovável incorporadas na rede, que garante maior fiabilidade no fornecimento de energia, fornece maior escalabilidade de modo a ter capacidade de suportar os aumentos de carga, bem como a prestação de serviços auxiliares [56, 64]. Quando a produção local não tem capacidade de alimentar o conjunto de cargas, a energia é comprada à concessionária da rede principal de distribuição de energia [56].

O comércio de energia P2P entre MR pode ser implementado através de um sistema multiagentes (*Multi-Agent System* - MAS). A arquitetura de rede P2P permite maior controlo em MR dinâmicas, possibilitando que os vários agentes se auto-organizem de forma autónoma através de comunicações descentralizadas [70]. Este método de comércio pode ser modelado através de MAS, bem como pela teoria dos jogos. As MR são representadas por agentes autónomos que tomam as suas decisões comerciais [66]. Os MAS são usados para o controlo coordenado de gestão de energia entre MR, através do uso adequado dos recursos locais de forma a suportar os respetivos consumos [66, 75, 76]. De acordo com [70], o MAS é constituído por múltiplos agentes inteligentes que interagem entre si para resolver o problema de défice de energia, através da cooperação, coordenação e negociação. Os MAS também podem ser utilizados na gestão de sistemas de armazenamento de energia, coordenando as ações de fornecedores e consumidores [66, 73]. Os vários agentes podem formar uma rede totalmente descentralizada, utilizando o protocolo de comunicação TCP/IP. Contudo, no MAS os agentes não podem comunicar instantaneamente com outros agentes, uma vez que existem apenas interações individuais (atuar apenas como consumidor ou fornecedor). No entanto, a implementação da rede P2P permite que os vários agentes possam atuar simultaneamente como fornecedores e consumidores [70]. Nas redes P2P a conectividade entre nós é realizada através de uma rede virtual contruída sobre a rede física [64, 70]. A conectividade entre nós pode ser realizada através de comunicações sem fios (*e.g.*, Bluetooth/IEEE 802.15.1, Zigbee/IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11) [70]. Deste modo, é

possível realizar grupos de MR através da conexão/desconexão por parte da camada virtual da arquitetura P2P [64, 66, 70].

A Tabela 5, apresenta de forma resumida as principais características da rede P2P no comércio de energia entre MR.

**Tabela 5 - Principais benefícios da rede *Peer-to-Peer* no comércio de energia**

<b>Características de rede P2P</b>	
<b>Eficiência</b>	A energia produzida e consumida localmente necessita apenas de linhas de transmissão de curtas distâncias. Esta vantagem diminui as perdas de energia nas linhas de transmissão e consequentemente o preço de energia a pagar pelo consumidor final.
<b>Resiliência</b>	Todos os elementos ativos contribuem de forma cooperativa para executar e manter a rede de energia. Esta característica permite à rede ter maior capacidade de recuperação na ocorrência de eventuais falhas.
<b>Segurança e Fiabilidade</b>	Caracterizada como uma rede descentralizada, não possui um ponto de falha central. Possibilita transações entre elementos sem a utilização de um intermediário.
<b>Flexibilidade</b>	Permite que qualquer elemento (participante) da rede comunique com qualquer um dos outros elementos. Deste modo, é possível satisfazer o aumento do consumo das cargas através da produção local da comunidade (MR).

Na transação de energia P2P entre MR isoladas é necessário ter em conta algumas regras:

- Cada MR deve satisfazer as suas cargas;
- Cada MR tem o seu próprio custo de geração de energia;
- Existe um custo associado à transferência de energia entre MR.

Na abordagem distribuída cada MR resolve o seu problema de otimização local trocando apenas a informação necessária com as outras MR [56]. Esta abordagem tem como objetivo reduzir os custos totais (*i.e.*, custos de geração e transmissão de energia) satisfazendo o

consumo de cada MR [56, 64]. No entanto, na realização de transações de energia entre MR, a privacidade é um fator importante para os operadores das MR. Para este efeito, a abordagem distribuída é a que melhor se adapta. Uma abordagem centralizada obrigaria a ter toda a informação (sobre geração de energia e custos de transmissão) disponível num controlador central.

A energia gerada por uma MR, num grupo de MR a operar em modo isolado, é determinada com base na energia consumida pelas respetivas cargas, pela energia exportada para outra MR e pela energia importada de outra MR. Deste modo, a energia gerada pela MR pode ser expressa pela seguinte expressão matemática [56]:

$$E_{G_{MRI}} = E_{C_{MRI}} + E_{G_{MRI}} = E_{C_{MRI}} + E_{exp} - E_{imp} \quad (3)$$

onde  $E_{G_{MRI}}$  é a energia gerada pela  $MRI$ ,  $E_{C_{MRI}}$  é a energia consumida,  $E_{exp}$  é a energia exportada e  $E_{imp}$  é a energia importada pela  $MRI$ .

Por norma, quando numa cooperação existem apenas duas MR, uma irá exportar energia enquanto a outra irá importar energia. Para este caso em particular, no cálculo de energia gerada, a MR que exporta irá ter um valor nulo de energia importada, enquanto o inverso ocorre para MR que importa energia. No entanto, para uma aliança superior a duas MR, a mesma MR pode exportar e importar energia em simultâneo [56, 64, 70]. Numa rede P2G, a energia produzida pelas unidades de geração e os sistemas de armazenamento são para consumo próprio. Numa rede P2P existe a possibilidade de troca de energia entre *prosumers* e consumidores de uma determinada comunidade [64, 73]. Na partilha de energia P2P, os elementos da MR podem ter conexão com a rede principal, existindo um medidor inteligente no PCC. Esta abordagem pode ser vantajosa nos casos em que existe excesso ou falta de energia na comunidade. Este processo é controlado pelo coordenador de partilha de energia (*Energy Sharing Coordinator* - ESC) que estabelece ligação com os controladores das unidades de geração e armazenamento da comunidade e com o medidor inteligente. O ESC também calcula faturas de energia dos clientes com base no mecanismo de preços P2P através de contadores inteligentes, registando a energia importada/exportada (por exemplo hora-a-hora ou a cada 30 minutos) [73]. Neste caso, uma determinada MR pode, por exemplo:

- Possuir um sistema de armazenamento de energia com uma capacidade que lhe permita armazenar a sua própria energia excedente, ou
- Armazenar energia importada (comprada a um determinado preço) para ser exportada mais tarde (vendida a um preço que lhe permita obter lucros).

## 6.2. Tecnologia *Blockchain*

A *Blockchain* é uma tecnologia que consiste no registo distribuído de informação. A descentralização de dados caracteriza-se como uma medida de segurança [77]. A tecnologia *Blockchain* é constituída por [66, 68]:

- Registos de dados distribuídos e partilhados (*i.e.*, registo de transações entre entidades - *ledgers*);
- Por um mecanismo de consenso descentralizado;
- Contratos inteligentes e segurança criptográfica.

Portanto, esta tecnologia permite plataformas de mercado totalmente descentralizadas para resolução de conflitos de interesses, fornecendo simetria de informação a todos os participantes [64]. Deste modo, é possível uma cooperação fiável entre participantes através de sistemas distribuídos sem supervisão central [78]. A *Blockchain* está na base da inovação tecnológica do *bitcoin*, servindo como mecanismo de verificação para cripto moedas [64, 79]. Por outras palavras, é uma base de dados distribuída que guarda registos de transações permanentemente e com elevado nível de segurança, permitindo também economia nas transações de menores quantidades [64, 77].

A base de dados *Blockchain* é constituída por dois tipos de registos: transações individuais e blocos. Um bloco é a parte atual da *Blockchain* onde são registadas algumas ou todas as transações mais recentes. Quando concluído, o bloco é guardado na *Blockchain* como base de dados permanente [64, 66]. Assim que um bloco é concluído é gerado um novo bloco. A *Blockchain* é composta por uma enorme quantidade de blocos interligados em cadeia, em que cada bloco possui uma referência para o bloco anterior [66, 68]. A arquitetura geral da *Blockchain* consiste numa rede P2P e um banco de dados descentralizado. A rede P2P na *Blockchain* consiste na troca de informação (recursos) entre elementos (participantes - representam os nós da rede). A informação introduzida na rede propaga-se de forma

encriptada e privada entre todos os nós da rede. Deste modo, não é possível rastrear quem adicionou a informação na rede, sendo apenas possível verificar a sua autenticidade [68]. A associação do banco de dados descentralizado com a rede descentralizada evita falhas no sistema. No caso de um nó se separar da rede, os restantes nós têm armazenada uma cópia exata de toda a informação partilhada. Ao invés, se for adicionado um novo nó à rede, os nós existentes criam cópias das suas informações para o novo nó [66, 68, 77]. Contudo, para resolver o problema de confiança entre membros são utilizados algoritmos de consenso. Na *Blockchain* nenhum dado inserido pode ser apagado e todas as novas inserções devem ser acreditadas por todos os nós. Só é adicionado um novo bloco quando cumpre a regra definida pelo algoritmo de consenso [68]. A definição de um algoritmo de consenso permite que a decisão, sobre o que será inserido na *Blockchain*, não dependa de nenhuma entidade. Existem diversos algoritmos de consenso tais como [68, 78]:

- Prova de trabalho (*Proof-of-Work*, PoW). O algoritmo PoW solicita aos nós que executem de forma rápida funções de *hashing* (mapeamento de dados de comprimento variável para dados de comprimento fixo) de clientes, para validação de dados. Este algoritmo requer uma grande capacidade de computação;
- Prova de participação (*Proof-of-Stake*, PoS). O algoritmo PoS implica nós com maior quantidade de validação de dados;
- Prova de participação delegada (*Delegated-Proof-of-Stake*, DPoS). O algoritmo DPoS é particularmente adequado para sistemas de transporte inteligentes (ITS), tal como o PoS.

As entidades pertencentes de uma *Blockchain* não necessitam de confiar umas nas outras, têm apenas de confiar na tecnologia *Blockchain*. A *Blockchain* tem como principais vantagens [64, 77]:

- Resistência a ataques maliciosos. Pelo facto de ser constituída por redes descentralizadas não tem um ponto central de falhas;
- As transações ocorrem diretamente entre entidades. Não é necessário um intermediário (terceira parte), o que diminui os custos das transações;
- As transações são realizadas de forma rápida. Processamento constante de transações;



- Transparência nas transações. As transações não podem ser alteradas ou apagadas (as transações entre entidades são imutáveis). As mudanças são visíveis por todos os membros da rede.

No entanto, a *Blockchain* é uma tecnologia ainda recente que apresenta alguns problemas de escalabilidade e número de transações limitados nas suas aplicações. A implementação complexa também tem apresentado desafios para investigadores, profissionais e utilizadores. Tendo em consideração estas desvantagens é recomendado adotar soluções híbridas entre a tecnologia *Blockchain* (sistema de rede P2P) e os sistemas convencionais P2G [64, 73].

### 6.2.1. Comércio de Energia de MMR baseados e *Blockchain*

A *Blockchain* tem-se revelado uma solução eficiente ao nível da transação de energia. Deste modo são registadas todas as transações de compra e venda de energia efetuadas pelas entidades participantes, bem como as transações que envolvem os consumidores finais. Este método também é utilizado na implementação DER associados a MMR [71]. O uso da tecnologia *Blockchain* nos mercados de energia permite que a geração de energia renovável e o consumo sejam diretamente transferíveis em moedas virtuais [80]. Sikorski *et al.* desenvolveu um mercado de eletricidade em pequena escala, baseado em *Blockchain*, designado de *Machine-to-Machine* (M2M) [64, 68]. A implementação da tecnologia *Blockchain* permite facilitar as interações M2M e estabelecer um mercado de eletricidade no contexto da *internet* das coisas (*internet of things* - IoT). Esta abordagem permite o desenvolvimento industrial e facilita a geração, venda e distribuição de energia com base em fontes renováveis [68]. Al Kawasmi *et al.* [81] desenvolveu um mercado local, baseado em *Blockchain*, de modo a facilitar aos participantes do mercado a comercialização anónima de emissões de carbono. A aplicação de *blockchains* permite negociações de energia (descentralizadas) através da transação P2P e garante uma maior privacidade e segurança em relação as tradicionais negociações centralizadas [64, 79, 81]. A estrutura de dados UTXO (*Unspent Transaction Output*) da *Blockchain* permite o equilíbrio energético nas transações efetuadas [66].

A tecnologia *Blockchain* vem revolucionar as redes elétricas tradicionais, através da sua capacidade em organizar, assegurar e coordenar uma rede elétrica com base na arquitetura

P2P [64, 71]. Esta tecnologia é fundamental para garantir a fiabilidade neste tipo de rede, permitindo monitorizar todos os equipamentos do sistema (*i.e.*, DERs), incluindo a capacidade de autenticar cada nó da rede. Deste modo, é possível ter várias fontes de energia locais, em que os vários produtores se podem tornar agentes autónomos [71]. De acordo com [82] o fornecimento de energia por parte das empresas de serviços públicos pode vir a ser assumido pelos mercados de MR nas comunidades locais. As MR asseguram o seu próprio fornecimento de energia e permitem maior facilidade nos mercados descentralizados, através do uso de *blockchains* em combinação com a crescente disponibilidade de DERs [64, 82].

A implementação da IoT neste tipo de redes permite que todos os dispositivos inteligentes comuniquem e compartilhem dados [68, 71]. Várias ideias e aplicativos com base na tecnologia *Blockchain* têm sido abordados para a introdução da funcionalidade transacional na IoT, tais como: IoTcoin [83]; Community currency [84]; IOTA [85]; ADEPT (*Autonomous Decentralized Peer-to-Peer Telemetry*) [86]. Assim, ao gerar e transacionar (comprar e vender) energia de forma mais eficiente, os sistemas elétricos tornam-se mais sustentáveis [64]. É possível às entidades, com capacidade de gerar e armazenar energia, realizar transações P2P automatizadas com entidades vizinhas. A implementação deste novo modelo de mercado tem como objetivo contornar os principais problemas das redes elétricas tradicionais, tais como: resiliência, segurança e sustentabilidade. Para resolver estes inconvenientes podem ser utilizadas redes elétricas descentralizadas constituídas de dispositivos inteligentes, possibilitando que todos possam contribuir com produção local de energia. O uso da tecnologia *Blockchain* possibilita que todos os participantes efetuem transações de compra e venda de energia, operando de maneira cooperativa [64, 71].

Relativamente à confiança entre participantes, o mecanismo de consenso pode variar para cada caso em específico. Para a criação de novos blocos é fundamental garantir a exatidão da informação, sendo necessário investir nos recursos computacionais adequados [66, 77]. No caso particular dos mercados comunitários de energia de MR, em que são conhecidos todos os participantes, a prova de entidade (mecanismo de autenticação de participante baseado em *hash*) tem custos menos dispendiosos que a prova de trabalho (PoW). Contudo, os mecanismos de autenticação de prova de entidade podem não garantir a resiliência e segurança necessárias para uma integração eficiente de recursos de energia distribuída [64].

O primeiro projeto de MR a usar a tecnologia *Blockchain* foi lançado pela empresa *LO3 Energy* em parceria com a *Consensus Systems*, implementado no Park Slope New York, em Brooklyn. Este projeto consiste numa plataforma de mercado comunitário de energia virtual, baseada numa *blockchain* privada e medidores inteligentes. É também composto por uma MR e pela rede de distribuição existente. A MR atua como *back-up* de modo a evitar quedas de energia, podendo operar em modo isolado [64]. Designado de *TransActive Grid*, este projeto teve como objetivo combinar toda a energia gerada localmente (edifícios residenciais), com os edifícios que precisassem de energia. Neste caso, as transações de energia são realizadas automaticamente através de contratos inteligentes (sem ou com a mínima intervenção humana). Em abril de 2016, foi realizada a primeira transação *peer-to-peer* de energia renovável gerada em uma *blockchain* [64, 71]. A implementação desta tecnologia fez com que a LO3 recebesse inúmeros pedidos de inscrição por parte de edifícios locais a quererem participar neste tipo de comércio inovador. Assim, em vez de pagarem a eletricidade a uma empresa de serviços de energia, que compra créditos de energia renovável, os consumidores locais têm a possibilidade de comprar energia diretamente aos produtores locais, a preços mais baixos e com menor impacto ambiental [71]. Existem outros projetos industriais de mercados de energia com base em *blockchain*, como o projeto Powerpeers e Share & Charge [64].

### 6.2.2. Tipos de *Blockchain*

O fluxo de energia em cada ponto da rede pode ser monitorizado através de uma ***Blockchain pública*** como a *Ethereum* [66, 82]. Esta plataforma permite realizar contratos inteligentes em redes descentralizadas através do armazenamento de informações com recurso à tecnologia *Blockchain*. A tecnologia *Blockchain* permite que a MR seja monitorizada em segurança e que os participantes efetuem as suas transações de energia de forma automática, a um custo razoável [82]. Nas *blockchains* públicas, as MR podem atuar como exploradores da rede de distribuição. Os benefícios financeiros de exploração devem ser incluídos no mecanismo de negociação da *Blockchain* de forma a cobrir o custo dos equipamentos para exploração [66]. No entanto, o uso de uma *Blockchain* pública apresenta problemas de privacidade e segurança. Neste caso os registos de comercialização de energia estão

acessíveis a todos os participantes, existindo a possibilidade de se obterem padrões de consumo de energia [66, 68].

O comércio de energia P2P também poder ser praticado por meio de uma **Blockchain privada**. Neste caso, a *Blockchain* limita o acesso de leitura a participantes específicos [68]. Este tipo de *Blockchain* consiste em fornecedores de energia (não propriamente energia renovável), que sustentam a rede de distribuição de energia. Estes *players* podem atuar como exploradores (investindo em equipamentos para esse efeito) e as MR podem ter apenas carteiras *Blockchain* [66].

Sumariamente, nas *blockchains* públicas as MR têm a possibilidade de exploração das redes de distribuição de energia, investindo em equipamentos para essa finalidade. Nas *blockchains* privadas as MR têm apenas carteiras *Blockchain*, em que as redes de distribuição de energia são exploradas pelos fornecedores de energia convencionais.

### 6.2.3. Métodos de Pagamento

A liquidação das transações de energia pode ser realizada através de moeda virtual (criptomoeda) ou de pagamentos convencionais.

O uso da criptomoeda permite efetuar pagamentos praticamente instantâneos através das transações virtuais [71, 79]. Estes pagamentos podem ser efetuados através do uso de uma *Blockchain* pública (e.g., *Ethereum* ou *Bitcoin*). Neste caso, a comercialização de energia P2P será implementada como uma *Sidechain* (validação de dados entre *blockchains*) [66, 71]. Apesar da sua fácil implementação, a taxa de câmbio flutuante para a criptomoeda pode ser um obstáculo.

A solução de pagamentos convencionais consiste na compensação das MR pelos fornecedores de energia. Neste caso, os fornecedores tradicionais de energia (concessionárias) podem investir na construção de redes de energia P2P, atuando como exploradores do sistema. As MR participam no comércio de energia P2P, podendo manter a sua interligação com a rede de distribuição tradicional. Neste tipo de configuração, as MR estão afiliadas a um fornecedor de energia. Deste modo, uma MR pode enviar energia para

outra MR em nome do fornecedor de energia. O pagamento do fornecedor às MR tem por base as quantidades de energia transferida [66].



## 7. SISTEMAS CIBER-FÍSICOS

---

Os sistemas ciber-físicos (*cyber-physical systems* - CPS) integram a ciência da computação, redes e processos físicos. Os CPS consistem em equipamentos eletrônicos com *software* integrado que são conectados entre si, ou via *internet*, para formar um sistema único em rede. Assim sendo, os CPS baseiam-se em três módulos funcionais: comunicação, computação e controlo. Devido a restrições físicas, algumas vulnerabilidades de segurança podem ser causadas por computadores e por redes embebidas, resultando na perda de dados e assim comprometer a segurança do sistema. Existem três tipos principais de ataques cibernéticos: ataques de negação de serviço (*denial of service attacks*), ataques de repetição (*replay attacks*) e ataques fraudulentos (*deception attacks*). A robustez, a segurança e a resiliência, bem como a estabilidade de um sistema, constituem os principais aspetos de combate aos vários ataques [87].

O avanço das tecnologias de computação, comunicação e *hardware* tem contribuído para o desenvolvimento dos CPS. Estes sistemas são aplicados em diversas áreas, por exemplo em edifícios, no controlo ambiental, em sistemas aeroespaciais, na assistência médica, na agricultura inteligente, em sistemas robóticos e em redes inteligentes [87, 88]. Os CPS são caracterizados por serem de larga escala e por terem vários dispositivos integrados. Estes podem ser: sensores e atuadores conectados em rede de modo a detetar, monitorizar e controlar o mundo físico. Os CPS estão fortemente relacionados com a criação da quarta revolução industrial. Naturalmente, as interconexões de componentes em redes de larga escala apresentam restrições físicas ou limitações tecnológicas. Assim, podem ser transmitidos dados de diversos componentes destas redes sem as proteções de segurança necessárias. A falta de segurança nestes sistemas dá origem a vulnerabilidades físicas inerentes, comprometendo a proteção contra ameaças. Esta situação coloca em risco a segurança, a estabilidade e a resiliência dos sistemas. Na Figura 26 apresenta-se um diagrama sobre a arquitetura típica dos CPS.

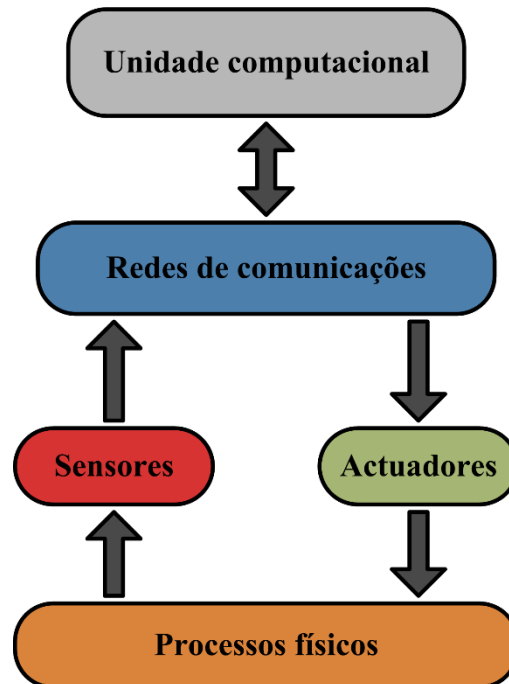


Figura 26 - Arquitetura geral dos CPS

### 7.1. Modelos de CPS para Aplicação Industrial

A modelização (*i.e.*, a criação de modelos) do CPS tem uma grande importância na compreensão e análise dos comportamentos dinâmicos do sistema. O CPS é considerado, geralmente, como um sistema de controlo de reorganização e reconfiguração dinâmica [87]. Neste contexto, o sistema de controlo tem um elevado grau de automação em múltiplas dimensões espaciais e temporais. Neste sistema existe um forte acoplamento e uma alta coordenação entre os meios físicos e cibernéticos. Neste caso, estes sistemas são classificados como CPS de parâmetros distribuídos (*distributed parameter systems* - DPS). O modelo distribuído pode refletir a complexidade da modelação do CPS considerando vários fenómenos ou requisitos de desempenho, tais como: protocolos de comunicação, assincronismo de tempo na medição e controlo, comunicação imperfeita (*i.e.*, interrupção de pacotes de dados ou atrasos induzidos pela rede).

As tarefas de controlo e monitorização são implementadas, geralmente, em plataformas digitais. Por norma, os componentes físicos (sensores, atuadores) são executados em modo contínuo no tempo, enquanto que os componentes cibernéticos (computação) operam em modo discreto [89]. Estes dois tipos de operações aumentam a complexidade da modelização



dos CPS. Para contornar este grau de complexidade temporal, nos CPS é utilizado um modelo de sistema híbrido. Este modelo permite analisar, projetar e otimizar o desempenho do sistema ou de alguns parâmetros, que apresentam em simultâneo, comportamentos dinâmicos de tempo contínuo e de tempo discreto.

A tomada de decisão dos CPS segue um comportamento associado à aplicação de inteligência artificial (*artificial intelligence* - AI) ou à previsão da intenção humana. Neste caso, referem-se as interações humano-humano por meio de máquinas em sistemas de controlo de supervisão e aquisição de dados (SCADA). No domínio da cibersegurança, os comportamentos dos cibercibernetas (atacantes ou defensores) podem ser descritos pelo processo de decisão de Markov. Este processo de decisão é capaz de caracterizar comportamentos complexos [87, 90]. O modelo de Markov é um modelo probabilístico que pode ser usado para previsão de dados de séries temporais, com capacidade de modelizar dados de segurança cibernetética. Este modelo consiste em determinar os parâmetros ocultos a partir de parâmetros observáveis.

Após a modelização do sistema, o primeiro passo é a aquisição de informação [89]. Os sensores coligam a informação sobre a operação física do sistema e partilham essas informações, em tempo real, com computadores e sistemas embebidos para controlo inteligente.

## 7.2. Tipos de Ataques

Como já referido, devido às vulnerabilidades dos CPS, os invasores introduzem *malware* nos sistemas, causando perturbações no seu funcionamento. Neste âmbito, os ataques cibernetéticos podem ser divididos em três categorias: ataques de negação de serviço (*denial of service attacks*), ataques de repetição (*replay attacks*) e ataques fraudulentos (*deception attacks*).

Os *denial of service attacks* consistem na tentativa de imobilizar os recursos do sistema. Do ponto de vista técnico, este tipo de ataque consiste em *softwares* maliciosos que consomem os recursos das máquinas em operação. O objetivo é interromper a atividade das máquinas através da sobrecarga dos seus recursos (*e.g.*, CPU, memória, largura de banda).

Os *replay attacks* são caracterizados por ataques ao protocolo de segurança do sistema. Para este efeito, o *modus operandi* usa repetições da transmissão de dados do sistema, executado por um remetente com acesso não autorizado. Assim, os invasores (*hackers*) enganam os participantes, fazendo-os acreditar que concluíram a transmissão de dados. Deste modo, os *hackers* obtêm acesso à rede, à informação confidencial, e até podem concluir transações duplicadas.

Por último, os *deception attacks* consistem em modificar a integridade dos dados. Como, por exemplo, reprogramar código em execução manipulando os comportamentos dos sistemas. Estes ataques são executados, normalmente, nos sistemas de transmissão da rede elétrica através das interfaces *remote terminal units* (RTU). Na Tabela 6 seguinte apresenta-se sucintamente as três categorias de ataques cibernéticos.

**Tabela 6 - Categorias de ataques cibernéticos**

<b>Tipo de ataque</b>	<b>Modus operandi/Efeitos</b>
<b>Negação de serviço (<i>Denial of Service - DoS</i>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Softwares</i> maliciosos, que consomem os recursos: CPU, memória, largura de banda;</li> <li>• Imobiliza os recursos do sistema;</li> <li>• Interrompe as atividades das máquinas em operação.</li> </ul>
<b>Repetição (<i>replay</i>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ataques ao protocolo de segurança;</li> <li>• Repetições de transmissão de dados;</li> <li>• Remetente com acesso não autorizado ao sistema;</li> <li>• Acesso à rede e a informação confidencial.</li> </ul>
<b>Fraudulentos (<i>deception</i>)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Modifica a integridade dos dados;</li> <li>• Reprograma código em execução;</li> <li>• Manipula comportamentos dos sistemas;</li> <li>• Ataque mais comum em redes de transmissão de eletricidade.</li> </ul>

### **7.3. Análise do Desempenho dos CPS**

A estabilidade é um requisito essencial nos sistemas dinâmicos. A fiabilidade, robustez e segurança também podem ser atribuídas aos CPS através de várias abordagens. No entanto, o desempenho dos CPS fica comprometido com diversos desafios, tais como: incertezas

ambientais, erros de modelação de operações físicas e de *software*, perturbações, e fenómenos indesejáveis introduzidos pelas redes e pelos vários ataques cibernéticos.

### 7.3.1. Robustez

A robustez é um fator de grande importância, sendo a capacidade que um sistema tem de reagir a eventuais falhas ou perturbações. Portanto, a robustez nos CPS também significa tolerância a falhas. Contudo, a estabilidade nos CPS deve ser garantida na presença de falhas cibernéticas e físicas. A fiabilidade da informação, em tempo real, nas redes de comunicação dos CPS também é fundamental para garantir a robustez do sistema [89].

### 7.3.2. Segurança

Relativamente à segurança, os CPS têm um elevado risco de ataques cibernéticos (face aos sistemas convencionais de controlo de rede). Este facto deve-se à introdução de redes de comunicação e elementos de tecnologia de informação (*Information Technology* - IT) heterogéneos, que originam o aumento das vulnerabilidades de segurança. A segurança nos CPS consiste em detetar e combater comportamentos maliciosos ou eventos imprevistos. De modo a diminuir os riscos de segurança, são adotadas duas técnicas para deteção de ataques à rede [87]. Estas técnicas consistem em ferramentas de segurança da informação e ferramentas de controlo. As ferramentas de segurança da informação são constituídas por mecanismos de autenticação e controlo de acesso, certificação de segurança, gestão de *patches* (atualização e correção de *software* para melhoria de desempenho) e sistemas de deteção de invasão. As ferramentas de controlo têm como funcionalidade a deteção e isolamento de ataques baseados em modelos, estratégias de controlo robustas que mantêm a estabilidade e o desempenho na ocorrência de ataques (*denial of service* e *deception attacks*) e estratégias de controlo reconfiguráveis para limitar o efeito das falhas correlacionadas.

Atualmente, são utilizados nos sistemas de energia elétrica os sistemas WAMC (*Wide-area monitoring and control*). Este sistema tem como função fornecer estabilidade em tempo real, com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema de energia [91]. No entanto, estes sistemas ainda apresentam algumas vulnerabilidades referentes à tecnologia heterogénea da informação e da comunicação.

### 7.3.3. Resiliência

Ao contrário da robustez e segurança que são previamente projetadas antes da ocorrência de ataques, a resiliência dos CPS consiste na capacidade de recuperação de eventuais ataques cibernéticos que ocorram no sistema. A capacidade de controlo da resiliência e da estimativa poderá ser obtida comparando as saídas com o comportamento ideal do sistema sob um modelo analítico. Este método é frequentemente utilizado na deteção e análise de falhas [87, 92]. O seu uso aplica-se a ataques contra o sistema de controlo, como por exemplo sabotar a informação adquirida por um determinado sensor. Isto é, fornecer leituras erradas ou atrasos de informação, bem como interromper o seu funcionamento. A resiliência contra estes ataques é concebida em algoritmos de controlo, sob a premissa de que o próprio controlador funcionará de acordo com o pretendido [92].

### 7.4. Deteção de Ataques em CPS Industriais

As vulnerabilidades dos sistemas surgem, principalmente, na integração de diversos componentes cibernéticos através de múltiplas redes. De modo a colmatar estes inconvenientes, são necessários métodos de deteção de ataques cibernéticos e controlo que garantam a segurança nas situações de ataques. Os ataques cibernéticos são prejudiciais a vários níveis, *e.g.*, económicos, bem como para a vida humana [87]. A deteção antecipada dos danos nos sistemas pode possibilitar o controlo dentro de um limite tolerável. Esta medida desempenha um papel importante na manutenção do desempenho dos CPS. Como tal, esta medida é implementada em diversos sistemas fundamentais, como sistemas de energia e redes de sensores.

Existem dois esquemas de defesa de ataques cibernéticos. Um consiste em proteger antecipadamente os componentes importantes dos sistemas e o outro consiste em identificar os dados falsos introduzidos pelos atacantes. Para o primeiro caso poderá ser utilizado componentes redundantes ou comunicações redundantes. Um exemplo, é a monitorização da informação através de unidades de medição fasorial (*phasor measurement units* - PMU), livres de ataques em sistemas de energia [93]. O segundo esquema pode ser aplicado na remoção ou correção dos dados contaminados quando os ataques são detetados.

Existem quatro estratégias principais de deteção de ataques, tais como:

- Deteção Bayesiana com hipótese binária;
- Abordagem *weighted least square* (WLS);
- $X^2$  – detetor baseado em filtros de Kalman;
- Técnicas quasi-FDI (*fault detection and isolation* - deteção e isolamento de falhas).

#### **7.4.1. Deteção Bayesiana com Hipótese Binária**

A deteção Bayesiana é uma das estratégias mais utilizadas para deteção de intrusão [87]. Este método consiste na avaliação de hipóteses pela máxima verosimilhança. A deteção de razão de verosimilhança pode ser reduzida a um teste de hipótese binária. Este teste consiste em testar uma hipótese alternativa, representada por  $H_1$  (sinal afetado por anomalia) contra uma hipótese nula, representada por  $H_0$ , que pode ser matematicamente formulada com base nas propriedades estatísticas dos sinais gráficos [94]. A hipótese alternativa ( $H_1$ ) é a hipótese considerada provável, enquanto a hipótese ( $H_0$ ) é a hipótese considerada improvável [95].

#### **7.4.2. Abordagem *Weighted Least Square* (WLS)**

O método dos mínimos quadrados ponderados (*weighted least square* - WLS) é outra abordagem utilizada na defesa de ataques, e que é cada vez mais utilizada em sistemas de energia [87]. O método WLS pode ser usado para maximizar a eficiência da estimativa de parâmetros. A aplicação deste método consiste na atribuição de pesos a cada dado correspondente ao parâmetro a avaliar, quando algumas medidas são mais precisas que outras. No caso do desvio padrão (dos erros aleatórios dos dados) não ser constante (em todos os níveis das variáveis explicativas) é atribuído um peso (inversamente proporcional à variância em cada nível das variáveis explicativas) de modo a fornecer uma estimativa mais precisa dos parâmetros em causa [96]. Deste modo é possível determinar a contribuição de cada observação para as estimativas finais dos respetivos parâmetros.

### 7.4.3. X2 – Detetor baseado em Filtros de Kalman

O detetor  $X^2$  tem a capacidade de detetar dados inválidos e dados falsos (como ataques DoS, ataques aleatórios de curto/longo prazo), integrando um filtro de Kalman (estimador de estados). No entanto, devido à dependência de características com base estatística, o detetor  $X^2$  é incapaz de detetar ataques falsos de injeção de dados derivados estatisticamente [87]. O filtro de Kalman tem como função estimar uma ampla gama de variáveis de estado dos processos associados ao modelo. As estimativas do filtro de Kalman e as leituras do sistema são enviadas ao detetor  $X^2$  ou ao detetor Euclidean (mais sensível a alterações que o detetor  $X^2$ ). O detetor  $X^2$  integrado com o filtro de Kalman permite medir a relação entre variáveis dependentes e uma série de variáveis preditivas [97]. Portanto, o filtro de Kalman estima estados não estáticos, mas sim variáveis.

Como exemplo de um processo em espaço de estados, consideram-se as seguintes expressões:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + Gw \\ y &= Cx + Du + v\end{aligned}\tag{4}$$

onde  $w$  representa o ruído do processo e  $v$  representa o ruído da medida, com médias nulas, independentes e com:

- $E(ww^T) = Q \rightarrow$  covariância do ruído do processo
- $E(vv^T) = R \rightarrow$  covariância do ruído da medida

Quando  $R$  diminui o ganho do estimador também diminui. O ganho do filtro de Kalman diminui à medida que o estimador inicial é mais confiável. Quando se tem uma boa estimativa inicial, os valores da covariância inicial são baixos, perto de zero. Deste modo, confia-se na estimativa inicial. No entanto, o contrário também é válido para valores altos. Para  $Q$  e  $R$  acontece o mesmo: valores altos indicam que não é muito confiável, ou que há muito ruído. Por exemplo para  $Q = 0.01$ , pode-se afirmar que o processo tem apenas algum

ruído, já para  $Q = 0.1$ , o processo tem um ruído significativo. Quando  $Q = 0$ , estamos perante uma resposta confiável [97, 98].

#### 7.4.4. Técnicas quasi-FDI

A deteção e isolamento de falhas (*fault detection and isolation* - FDI) é uma abordagem eficaz na monitorização de sistemas e na identificação de ocorrências (quando, tipo e localização de falhas). Esta técnica, tem uma grande aplicação em sistemas de controlo em rede. A principal característica desta abordagem é a sua capacidade de aprender (i) nas condições nominais do sistema sob inspeção e (ii) na coleção de falhas a partir dos dados adquiridos [87]. No entanto, a aplicação desta técnica (na segurança dos CPS) deve ser cuidadosamente reexaminada aquando de ataques cibernéticos ou de falhas de componentes/mecanismos físicos.

### 7.5. Aplicações dos CPS

Os CPS são usados em aplicações com sistemas físicos complexos com comunicação digital. Como tal, os CPS abrangem uma vasta área de aplicações de forma a que o seu desempenho seja otimizado e a sua eficiência melhorada [99]. Principais áreas de aplicação de CPS [100]:

- Ambiente fabril - visam melhorar o controlo, monitorização, segurança, eficiência, bem como a fiabilidade dos processos fabris (nas mais diversas áreas), partilhando informação em tempo real das respetivas máquinas industriais;
- Área da saúde - monitorização remota e em tempo real das condições físicas dos pacientes, limitando a hospitalização. Podem também ser usados na investigação das neurociências para compreender melhor as funções humanas (com o suporte de interfaces humano-máquina e robótica terapêutica);
- Energia renovável - uso de dispositivos de monitorização da rede, para estabelecer um maior controlo, fiabilidade e melhorar a eficiência no consumo de energia;
- *Smart Cities* - interação com dispositivos inteligentes para reduzir o consumo de energia, aumentar a segurança, de modo a melhorar o conforto dos habitantes. Os CPS podem ser utilizados para ativar sistemas de monitorização e controlo de

energia, contribuindo para o aumento de habitações de *net zero energy*, bem como diminuir falhas após ocorrências inesperadas;

- Área dos transportes - comunicação entre veículos associados a uma determinada infraestrutura de comunicação. Compartilha de informações em tempo real, tais como as referentes ao trânsito, localização, ou problemas, de modo a prevenir acidentes ou congestionamentos, aumentando a segurança viária;
- Área agrícola - modernização do setor agrícola, tornando-o mais rigoroso, eficiente e ecológico. Recolha de informações do clima e do terreno, criando sistemas de gestão agrícola mais eficientes;
- Redes de computadores - visam impulsionar a criação de ambientes virtuais para se compreender melhor os comportamentos dos sistemas e dos utilizadores. Os CPS melhoram o desempenho e a gestão dos recursos envolvidos. As redes sociais e *websites* armazenam informação de navegação dos utilizadores, os CPS analisam essa informação, prevendo os interesses deles e recomendando amigos, por exemplo.

## 7.6. CPS em Microrredes

A transformação das redes de energia elétrica tradicionais em redes inteligentes pode ajudar a revolucionar o setor de energia em termos de fiabilidade, desempenho e capacidade de gestão. Contudo, os aumentos da conectividade na rede elétrica para comunicações bidirecionais apresentam várias vulnerabilidades de segurança.

As microrredes elétricas necessitam de dispositivos de monitorização de rede, bem como a integração de dispositivos inteligentes. Deste modo, é possível garantir um maior controlo, aumentar a segurança da rede e melhorar a eficiência no consumo de energia. As MR com estas características apresentam menos falhas, mesmo após eventuais ocorrências inesperadas. Para garantir uma maior segurança nas MR pode-se utilizar o conceito de *Defense-in-depth* (defesa em profundidade). Esta abordagem consiste na coordenação de múltiplas camadas de segurança, com o objetivo de abordar vulnerabilidades associadas a pessoas, tecnologia e operações [101]. O conceito de *Defense-in-depth* é composto por quatro etapas:



**1. Proteção**

- Políticas e procedimentos (segurança física, autenticação)
- Segurança de rede (segmentação de rede, criptografia)

**2. Detecção**

- Monitorização em tempo real

**3. Resposta**

- Combater as consequências e os impactos
- Rapidez, através das ferramentas de planeamento e apoio à decisão

**4. Restauração**

- Recuperar a funcionalidade do sistema

De modo a melhorar a segurança cibernética nas MR, a arquitetura do sistema de controlo deve ser composta por quatro camadas:

- A camada corporativa, constituída pelas interfaces do utilizador;
- A camada de supervisão, constituída pelas aplicações específicas de sistemas de controlo;
- A camada dos sistemas de controlo industrial, composta pelos dispositivos de controlo e comunicação, sensores e atuadores;
- A camada referente ao processo controlado, correspondente à infraestrutura a controlar.

A Tabela 7 descreve, de forma sucinta, cada uma destas camadas.

Tabela 7 - Arquitetura do sistema de controlo [101]

Camada	Categoria	Software/Hardware
<b>Corporativa</b>	Interfaces do utilizador	<i>Human-Machine Interface (HMI) software</i>
		Exibição de estados
		Interruptores e mostradores
<b>Supervisão</b>	Aplicações de sistemas de controlo	<i>Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)</i>
		<i>Energy Management System (EMS)</i>
		<i>Distributed Control Systems (DCS)</i>
		Histórico de dados
<b>Sistemas de Controlo Industrial</b>	Dispositivos de controlo e comunicação	<i>Programmable Logic Controllers (PLC)</i>
		<i>Remote Terminal Units (RTU)</i>
		<i>Intelligent Electronic Devices (IED)</i>
	Sensores	Acelerómetros
		Fotoelétricos
		Indutivos
		Termopares (temperatura)
		Ultrassons
	Atuadores	Disjuntores/Interruptores
		Motores
		Válvulas
<b>Processo Controlado (infraestrutura)</b>	Processo físico	Fabricação (linhas de montagem)
		Refinação de óleo e gás
		Distribuição e transmissão elétrica

Na conceção e implementação de sistemas de controlo para MR deve-se optar pelas melhores práticas. Neste âmbito, deve ponderar-se a segmentação da rede e ter em conta critérios de planeamento efetivos. Assim, é possível reduzir as vulnerabilidades, as consequências causadas pelos ataques e o tempo de recuperação [101, 102]. Para se alcançarem estes objetivos é necessário ter as seguintes precauções:

1. Identificar todos os atores (operador da MR, administrador de rede, utilizadores corporativos, fornecedores);
2. Descrever os requisitos de troca de dados (tipo, volume, fiabilidade, confidencialidade);
3. Definir enclaves de segurança;

4. Definir domínios funcionais aplicáveis a IED;
5. Projetar e aplicar outros controlos de segurança cibernética (*i.e.*, interface de rede, *firewalls*, monitorização).

Também existem outros tipos de ferramentas de combate a ataques cibernéticos, como é o caso da plataforma de testes *Achilles* [103], desenvolvida pela *General Electric*. Esta plataforma tem como função certificar que os dispositivos ativos numa rede não estão vulneráveis a ataques cibernéticos. A plataforma suporta vários protocolos de comunicação [103], tendo robustez para monitorização de testes de rede e parâmetros operacionais, permitindo detetar vulnerabilidades e reduzir falhas.

A segurança cibernética é de extrema importância nas MR e vice-versa. De acordo com [104], um ataque cibernético a uma rede elétrica tem um efeito muito mais devastador do que os danos causados por uma tempestade. Ao contrário dos atos da natureza, a maioria dos ataques cibernéticos são feitos sem alertas, e muitas das vezes só são detetados muito tempo após o ataque. Um ataque cibernético a uma rede elétrica pode originar o corte de eletricidade em grandes áreas e por longos períodos de tempo, devido a eventuais falhas em cascata. Deste modo, as MR têm uma grande importância, pelo facto de fazerem parte do plano de recuperação. Quando existem falhas na rede elétrica, as MR têm a capacidade de fornecer energia de forma segura nesses períodos e, assim, dar suporte à rede.

## 7.7. Sistemas de Controlo Industrial

Os Sistemas de Controlo Industrial (*industrial control systems* - ICS) têm como função o suporte (apoio) de empresas individuais, bem como de infraestruturas nacionais em toda a parte do mundo. Estes sistemas permitem estabelecer o controlo de centrais nucleares e centrais elétricas, sistemas de distribuição de água, gás e locais de fabrico. Atualmente, estas organizações estão frequentemente sujeitas a ataques cibernéticos com o intuito de espionar, comprometer e prejudicar o seu funcionamento normal. Anteriormente, as redes industriais eram separadas das redes corporativas [105]. No entanto, os ganhos significativos de eficiência e a vasta tendência para a conectividade digital entre dispositivos impulsionou a convergência entre os sistemas de tecnologia operacional (*Operational Technology* - OT) e tecnologia de informação (*Information Technology* - IT). A introdução de novas tecnologias

de controlo e da Internet das Coisas Industrial (*Industrial Internet of Things* - IIoT) também contribuíram para a complexidade e conexão dos sistemas tradicionais de OT [105, 106].

Com a convergência dos sistemas OT e IT as equipas de segurança de IT têm tido uma grande tendência em assumirem a responsabilidade da segurança dos sistemas OT. Contudo, os sistemas OT exigem diferentes conhecimentos e práticas de trabalho especializadas que devem ser superadas através da aprendizagem. A crescente exposição de dispositivos OT em ambientes ICS e SCADA tem aumentado as suas vulnerabilidades a ataques cibernéticos, tornando mais difícil a sua proteção e originando grandes danos físicos e perigo à vida pessoal [105, 107].

### **7.7.1. Sistemas de Controlo e Supervisão**

O ICS é um termo geral que abrange vários tipos de sistemas de controlo na indústria, tais como SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), DCS (*Distributed Control Systems*) e IACS (*Industrial Automation and Control Systems*). Os IACS são uma forma de tecnologia operacional que envolve supervisão e coordenação dos dispositivos de controlo (sensores e atuadores) com a função de monitorizar e atuar nos processos físicos [105, 107]. Os sistemas corporativos de IT e OT têm funcionalidades distintas, mesmo quando operam na mesma organização. Apesar das suas diferenças, ambos têm sofrido ataques cibernéticos cada vez mais poderosos e destrutivos [107].

A fiabilidade e a segurança são as principais preocupações nos ICS. No entanto, a convergência dos sistemas OT e IT tem sido impulsionada pelas pressões económicas resultantes da globalização e da intensificação da concorrência, bem como pelos benefícios que oferecem, como o melhor desempenho, otimização de negócios, maior controlo e redução de custos. A junção destes dois sistemas representa um desafio operacional, técnico e estratégico para as organizações. A estratégia de segurança integrada exige que os CISO (*Chief Information Security Officer*) reformulem as suas práticas de segurança corporativa atuais, desenvolvam novos recursos e funções de segurança para sistemas OT. Responsáveis pela segurança dos sistemas OT e IT, os CISO passaram a ser responsáveis pela segurança dos ICS sem necessariamente possuir conhecimentos especializados em OT. Com esta mudança organizacional surgiram novos riscos tecnológicos e uma nova gestão de

alterações, tornando-se numa prioridade operacional urgente [105]. Contudo, a segurança dos sistemas OT pode vir a ser melhorada através das alterações de arquitetura derivadas da convergência entre os dois sistemas. A partilha da mesma arquitetura de rede pode originar novas estratégias de monitorização e de deteção nos sistemas OT e IT, bem como a extensão das abordagens de monitorização modernas de tráfego de IT para as redes ICS [107, 108].

### **7.7.2. *Industrial Internet of Things***

A adoção de dispositivos da *Internet of Things* em ambientes tradicionais de ICS tem ajudado a impulsionar a tecnologia operacional. A *Internet of Things* tem contribuído para mudanças gerais nas diversas formas de comunicação em rede através da introdução de novas classes de dispositivos. A mudança na computação de plataformas únicas para nós altamente distribuídos tem sido uma alteração atual devido a disponibilidade de dispositivos pequenos e inteligentes. A Internet das Coisas Industrial (*Industrial Internet of Things* - IIoT) consiste na adoção de arquiteturas e tipos de dispositivos de IoT em ambientes de controlo, contribuindo para o aumento dos sistemas baseados em PLC (*Power Line Communication*) com redes de sensores distribuídas. Esta nova abordagem implicou de forma significativa o projeto e segurança de ambientes de controlo. A complexidade da rede aumentou drasticamente com a inserção das redes de sensores, aumentando o número de dispositivos conectados. Por norma, os dispositivos são conectados à rede por meio de comunicações sem fios, com processamento e análise distribuídos [105]. No entanto, este recente avanço tecnológico está a causar situações de potenciais ataques cibernéticos nos ICS em milhões de residências, devido à crescente implementação de *Smart Grids*.

### **7.7.3. Ameaças e Vulnerabilidades**

Os ambientes ICS estão sujeitos a várias ameaças à segurança cibernética, podendo sofrer ataques altamente sofisticados que comprometam as suas operações e causem danos elevados. A maioria dos ataques cibernéticos ocorre devido às vulnerabilidades da rede ou a eventuais erros humanos. Apesar destes sistemas serem interoperáveis e resilientes é difícil manter a sua proteção [106, 107]. Embora a segurança seja uma vantagem para ter um

sistema isolado, tal medida, dificulta o acesso a dados para tomadas de decisão de uma empresa ou, à monitorização de sistemas de outras redes, por parte dos operadores de controlo. A maioria dos ICS tem instalações descentralizadas, como no setor do gás, óleo, água, energia, o que também dificulta a proteção física da rede.

Por outro lado, um facto que também contribui para o aumento dos ataques cibernéticos são as ameaças internas. Muitas das vezes, os processos de remodelação, como instalação de equipamentos novos, e alterações de infraestruturas para responderem aos avanços tecnológicos, bem como o fabrico de produtos nas organizações é realizado por pessoal permanente ou por especialistas contratados a curto prazo. Por norma, estes indivíduos interagem com os sistemas de controlo, ficando com privilégios que lhes permite modificar configurações de processos. Deste modo, a organização fica sujeita a ataques por parte de indivíduos mal-intencionados ou insatisfeitos. Uma vez que tem acesso “interior”, estes indivíduos têm maior facilidade em sabotar os processos, conseguindo interferir na monitorização de processos de forma disfarçada [105].

O aumento significativo das conexões entre sistemas ICS, redes corporativas e a internet, juntamente com as alterações de tecnologia para sistemas mais padronizados tem originado a suscetibilidade a ataques de rede, principalmente nos ambientes IT [107]. Deste modo, qualquer conexão à internet pode ser explorada, mesmo de forma indireta. Os protocolos e interfaces dos ICS são facilmente explorados. A utilização de VPN (*Virtual Private Network*) para proteção de operadores de ICS, também não é suficiente uma vez que é comum o acesso físico a *switches* de rede e não fornece cobertura total. Portanto, após uma breve análise dos fatores que proporcionam ataques aos ICS, as ameaças a este tipo de sistemas consistem principalmente em ameaças persistentes avançadas (*advanced persistent threats* - APT), interrupção de serviços de redes de dados, sabotagem de informação, erros humanos e negação de serviços distribuídos (*distributed denial of services* - DDOS) [105].

Os ataques aos sistemas ICS passaram a ser mais notórios desde a descoberta de um poderoso ataque designado de Stuxnet no ano de 2010, que contribuiu para o aumento de ameaças em sistemas industriais. A partir desta data as organizações começaram a ter uma maior noção das vulnerabilidades existentes e a depararem-se com ataques altamente sofisticados, com capacidade de comprometer processos físicos de grande escala, bem como a capacidade de espionagem cibernética de longo prazo, ou seja, dificilmente detetável. Desta maneira, os

dispositivos dos ICS tornaram-se extremamente inseguros, uma vez que apesar dos meios de segurança existentes, estima-se que existem muitos outros ataques que nunca foram detetados.

Em 2014, uma fábrica de aço sofreu um ataque que permitiu aos invasores obter acesso à rede e interromper as redes de produção, causando enormes danos [105]. Em 2015 e 2016 a Ucrânia sofreu um ataque cibernético na sua rede de energia [105, 107]. Os ataques altamente sofisticados comprometeram ICS e ambientes SCADA, alertando de que o setor de energia estava sujeito a vários ataques. Mais recentemente, num relatório da indústria do ano de 2016 foi descoberto que os ataques direcionados a ICS aumentaram mais de 110% comparado com o ano anterior. Em 2017, um estudo da *System Administration, Networking and Security* (SANS), descobriu que 69% dos profissionais de segurança dos ICS acreditavam que as ameaças a estes sistemas eram críticas, com capacidade para causar enormes danos, em que a maioria podia ser danos incontornáveis [105].

A segurança cibernética tem sido um enorme desafio para as equipas de gestão de todos os setores e domínios de negócio [108]. Um relatório do *Cybersecurity Research Group* refere que 67% das empresas com uma infraestrutura crítica sofreram, no mínimo, um ataque cibernético no último ano e 78% esperavam que os seus sistemas de controlo e supervisão (ICS e SCADA) fossem explorados nos anos seguintes [105]. Os atuais *malware* têm conseguido penetrar os sistemas de controlo de forma persistente e silenciosa, obtendo dados confidenciais. As atuais defesas existentes, como os *firewalls*, não tem tido capacidade de lidar com os principais ataques sofisticados. As comunidades de segurança atuais têm declarado que estamos a assistir a um novo período crítico de ataques cibernéticos, devido às crescentes vulnerabilidades por parte dos dispositivos nos sistemas de controlo [105, 106].

## **7.8. Defesa Cibernética para Energia e Serviços Públicos**

A segurança cibernética no setor de energia e serviços públicos tem tido uma alta prioridade ano após ano devido ao constante desenvolvimento tecnológico. Nos sistemas de geração e distribuição de energia modernos é de grande importância a implementação de sistemas de controlo industrial complexos, bem como redes internas geograficamente distribuídas. No entanto, a exposição de tais sistemas introduz riscos significativos referentes a ataques cibernéticos [106]. Os serviços públicos, indústrias, bem como as infraestruturas de outras

organizações enfrentam enormes desafios relativamente à segurança cibernética. Estas entidades tendem em encontrar mecanismos de proteção para as mais diversas tecnologias de modo a obterem alertas precoces de eventuais ameaças que comprometam as suas operações. A deteção e respostas antecipadas podem evitar danos elevados nos ambientes OT e IT das organizações [105, 107]. Os ataques são uma constante preocupação no setor de energia, devido a modernização das suas infraestruturas. As ameaças propagam-se de formas inesperadas, ao que se deve considerar todas as invasões possíveis, como unidades de crime industrializado; longos períodos de inatividade criando custos dispendiosos; e exposição de informação confidencial ao público [106].

Atualmente, as ameaças sofisticadas dos invasores recaem sobre as redes elétricas, tendo por objetivo dismantelar infraestruturas e efetuar extensas sabotagens. A segmentação de empresas de energia e serviços públicos tem contribuído para o aumento de vulnerabilidades, podendo originar danos catastróficos à infraestrutura física e significativas consequências inesperadas a jusante do ataque. Por norma, existem dispositivos de terceiros frequentemente conectados à internet ou acidentalmente conectados à rede corporativa. A difusão da IIoT contribui para o desafio constante da monitorização de todos os dispositivos da rede e garantir a sua segurança [105].

Os métodos de *machine learning* atuais têm a capacidade de aperfeiçoar a precisão de deteção de ameaças e aumentar a visibilidade da rede, através do aumento do volume de análise computacional capazes de processar. Para além destas características, têm a capacidade de resposta autónoma sabendo como e quando combater ameaças em progresso [108]. A rápida evolução das ameaças obriga a que muitas empresas líderes em energia tomem medidas de precaução para acompanhar as anomalias e incidentes emergentes que surgem dentro dos seus sistemas [106].

### **7.8.1. *Industrial Immune System***

A *Darktrace*, empresa global de inteligência artificial para segurança cibernética nos diversos tipos de redes (física, *cloud*, virtuais), sistemas de controlo industrial e IoT, implementa a sua tecnologia *Industrial Immune System* em ambientes de OT e IT, fornecendo cobertura total a uma organização [105]. Esta inovação consiste na implementação de um “sistema imunológico” construído com base em matemática



Bayesiana, recorrendo ao uso de algoritmos AI (*Artificial Intelligence*) e *machine learning*. A utilização destas abordagens permite definir um “padrão de vida” único (próprio) para ambientes OT e IT, criando uma imagem abrangente e integrada de toda a empresa em toda a sua complexidade. Deste modo, a aplicação da tecnologia *Industrial Immune System* permite visualizar os dados de uma rede de ICS em tempo real, com capacidade de detetar ameaças através da sua abordagem probabilística [105, 106]. A inteligência artificial e o *machine learning* representam uma importante oportunidade à indústria de segurança cibernética. A arquitetura implementada na tecnologia da *Darktrace* permite a sua própria adaptação e autoaprendizagem nos sistemas onde é implementada [108]. Esta capacidade de adaptação permite com que ameaças novas e personalizadas sejam também detetadas e combatidas. As fortes evidências de ameaças são analisadas através da interface gráfica 3D do *Threat Visualizer* (Visualizador de ameaças) de modo a que os analistas de segurança não sejam indevidamente sobrecarregados de falsos alarmes [105, 108].

A conexão de novos dispositivos numa rede industrial implica o aumento do risco associados às ameaças, sendo que a mínima interrupção poderá causar enormes prejuízos. A tecnologia implementada pela *Darktrace* é executada num servidor conectado passivamente a rede ICS, recebendo cópias do tráfego de comunicações sem interferir com a rede de controlo. Uma arquitetura distribuída e flexível permite cobrir com segurança vários níveis de confiança e uma grande variedade de topologias. A confidencialidade das redes ICS consiste em níveis de confiança, conforme o modelo de referência ISA95/*Purdue* [109]. Esta ferramenta da *Darktrace* pode ser conectada no nível 2 (controlo e supervisão), no nível 3 (servidores de dados) e no nível 4 (redes IT) de modo a fornecer uma defesa em profundidade. Contudo, também amplia a cobertura de segurança no nível 1 (dispositivos). A sua prova de valor (*proof of value* - POV) permite às organizações experimentar a sua capacidade de detetar ameaças, anomalias e comportamentos dentro dos ambientes a ser implementado, podendo também obter relatórios semanais produzidos pela equipa de segurança cibernética. Algumas organizações testam esta ferramenta nos seus sistemas IT corporativos e só depois iniciam a instalação nas redes ICS [105].

De acordo com o Departamento de Segurança Interna de Homeland nos Estados Unidos, no período de 2014 a 2015 os incidentes cibernéticos contra infraestruturas aumentaram 20%. Esta é uma tendência devido ao facto de os governos fornecerem mais recursos de guerra cibernética e os criminosos reutilizem *malware* desenvolvido por células de *hackers*

patrocinadas pelo estado. No ano de 2016, foram relatados ataques cibernéticos por 75% das empresas de petróleo, gás e eletricidade [106]. Os *hackers* conseguiram combater *firewalls*, programas antivírus entre outras formas de proteção. Destas empresas, 80% estimaram sofrer um ataque prejudicial para a sua infraestrutura física em 2017.

Em [106], é apresentado um caso de estudo da empresa britânica Drax, produtora de energia elétrica, com uma infraestrutura de energia que fornece cerca de 7% da eletricidade do Reino Unido. A Drax é considerada uma das organizações mais voltadas para o futuro no setor de energia e serviços públicos, devido ao seu processo de mudança para uso de geradores de biomassa. No entanto, o setor de energia encara ameaças cibernéticas de rápida evolução, nas quais os invasores são cada vez mais sofisticados, conseguindo invadir os limites da rede e infiltrar sistemas operacionais extremamente sensíveis. Neste sentido, foi necessário adotar medidas para as diversas implicações de segurança e integridade da infraestrutura nacional. Deste modo, esta empresa necessitava de ter capacidade para identificar ameaças emergentes e de intervir de forma antecipada para proteger os seus sistemas. Como solução a Drax utilizou a avançada plataforma de *cyber AI* da *Darktrace* beneficiando de um sistema de autoaprendizagem que forma uma compreensão adaptável de normalidade e anormalidade dentro dos seus sistemas de dados. A fim de implementar o *Enterprise Immune System* [108] na sua rede corporativa, a Drax ampliou a cobertura do seu sistema de controlo industrial para defesa de eventuais ataques. A implementação deste sistema teve como resultado a visibilidade geral dos ambientes de IT e OT em um único painel.

Outro caso de estudo de características idênticas é mencionado em [110], onde a empresa *Energy+* de distribuição de energia, com sede no Canadá apresenta algumas vulnerabilidades. A *Energy+* fornece energia para mais de 64000 clientes (residenciais, comerciais, industriais e institucionais), abrangendo uma área de 1700 Km<sup>2</sup> de linhas de energia. Inicialmente, a empresa tinha como vulnerabilidades a incapacidade de detetar ameaças de rápida evolução, não tinha uma abordagem proativa para defesa cibernética, bem como a visibilidade incompleta da rede. De modo a contornar estes problemas a empresa instalou o *Enterprise Immune System* da *Darktrace* no coração da sua rede corporativa. Após a instalação, a rede foi imediatamente mapeada na totalidade (visibilidade completa), incluindo utilizadores e dispositivos para a interface gráfica 3D do *Threat Visualizer* (Visualizador de ameaças). Posteriormente, foram detetadas ameaças em tempo real, que impediram uma possível catástrofe na empresa. Deste modo, a empresa tornou a ganhar

confiança na sua capacidade de segurança, passando a ter capacidade de detetar e combater ataques de rápida evolução e cada vez mais automatizados. Com a instalação deste sistema a empresa recuperou o controlo da sua rede.

Em [108] é possível consultar outros casos idênticos de ameaças que não foram detetadas pelas ferramentas de segurança tradicionais, mas que a *Darktrace* identificou através da sua abordagem de *self-learning* (autoaprendizagem), como o caso de roubo automatizado de credenciais, invasão a um leitor biométrico, roubo de dados de uma rede elétrica industrial, entre outros.



## 8. CASO DE ESTUDO

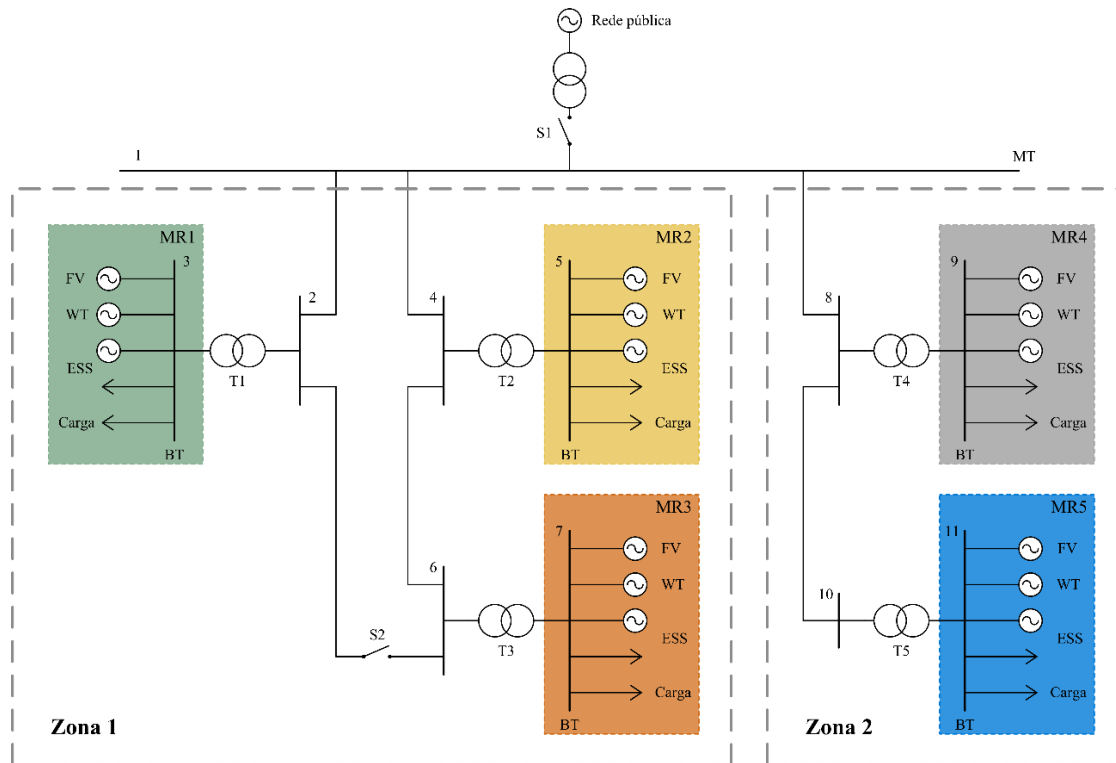
---

Neste capítulo é apresentado um caso de estudo para avaliar a cooperação entre múltiplas microrredes industriais autónomas. Esta cooperação permite que cada MR individual compartilhe os seus recursos com as restantes MR vizinhas, a fim de garantir um fornecimento de energia contínuo às cargas essenciais durante o modo de operação isolado. As bases estabelecidas para a cooperação entre MR seguem uma abordagem semelhante às dos mercados de energia elétrica. O comércio de energia durante o modo de operação isolado é feito hora a hora através de três modelos de mercado distintos, estabelecendo preços e quantidades de compensação de mercado (*Market Clearing*), no mercado de eletricidade centralizado (*pool*) assimétrico. A compensação de mercado ocorre em situações em que a quantidade da procura iguala a quantidade da oferta de energia. Na compensação de mercado, o ponto de equilíbrio corresponde ao par de valores: quantidade de energia e respetivo preço [111]. Neste estudo, a compensação de mercado no *pool* assimétrico consiste em ofertas de venda ou ofertas de compra e a respetiva quantidade de energia. Cada uma destas ofertas (venda ou compra) tem uma ordem de mérito associada. As ofertas de venda são organizadas por ordem de mérito ascendente, da oferta mais baixa para a oferta mais alta. As ofertas de compra são organizadas por ordem de mérito descendente, da oferta mais alta para a oferta mais baixa [112]. Deste modo, são analisados três modelos de mercados neste caso de estudo. O modelo assimétrico para ofertas de venda, o modelo assimétrico para ofertas de compra e o modelo assimétrico sequencial para ofertas de venda e ofertas de compra [67]. A coordenação do comércio de energia entre MR é realizado através de um algoritmo desenvolvido em *Matlab*.

### 8.1. Múltiplas Microrredes

O caso de estudo inclui cinco MR industriais dispersas na rede. Cada MR corresponde a uma empresa distinta, com diferentes capacidades de geração instalada, capacidade de armazenamento e perfis de carga. A rede é dividida em duas zonas distintas. A zona 1 é constituída pela MR1, MR2 e MR3, podendo operar tanto na configuração radial como em

anel através da abertura/fecho do *switch* S2, enquanto a zona 2 é composta pela MR4 e MR5 operando apenas na configuração radial. Neste caso de estudo, as múltiplas MR são desconectadas da rede de distribuição principal, operando assim de forma autónoma através da abertura do *switch* S1, durante um dia inteiro (*i.e.*, 24 horas). Cada MR é conectada à rede de distribuição de energia entre MR através de um transformador redutor MT/BT. A Figura 27 apresenta o esquema elétrico da rede de 11 barramentos, contendo as cinco MR correspondentes ao estudo e a identificação das respectivas zonas. As simulações apresentadas nas próximas secções são realizadas com o *switch* S2 fechado, ou seja, com a zona 1 a operar na configuração em anel. Os dados referentes a cada ramo da rede são apresentados na Tabela 8.



**Figura 27 - Esquema elétrico das múltiplas microrredes**

A tabela seguinte (Tabela 8) apresenta de forma detalhada os dados correspondentes a cada ramo da rede, nomeadamente a resistência, a reatância e a suscetibilidade de cada ramo.

Tabela 8 - Dados dos ramos

Ramo		Impedância da Linha		Suscetibilidade da Linha
Do Barramento	Para o Barramento	R (pu)	X (pu)	B (pu)
1	2	0,0612	0,04524	0,0000828
2	6	0,0816	0,06032	0,00001104
1	4	0,0612	0,04524	0,0000828
4	6	0,0408	0,03016	0,0000552
1	8	0,8771	0,4728	0,0000087
8	10	0,8771	0,4728	0,0000087
2	3	0	12,5	0
4	5	0	12,5	0
6	7	0	12,5	0
8	9	0	12,5	0
10	11	0	12,5	0

### 8.1.1. Carga/Consumo

No modo de operação normal (conectado à rede principal) cada MR opera com a potência nominal, relativamente ao seu consumo de energia. No entanto, durante o modo de operação isolado, cada MR reduz o seu consumo para garantir o fornecimento contínuo de energia às suas cargas cruciais (consumos mínimos). A redução do consumo de energia no modo de operação isolado é realizada de forma proporcional aos diferentes níveis de consumo que cada MR possui durante o modo de operação normal. As Figura 28 e Figura 29 mostram o perfil de carga correspondente a cada MR no modo de operação normal e no modo de operação isolado a cada hora do dia, respetivamente.

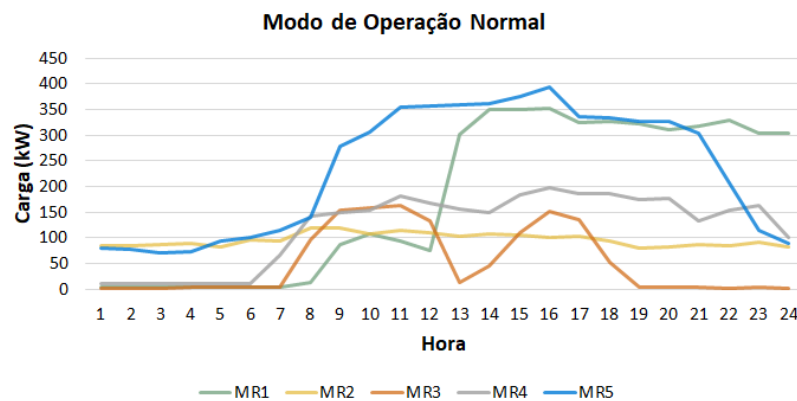
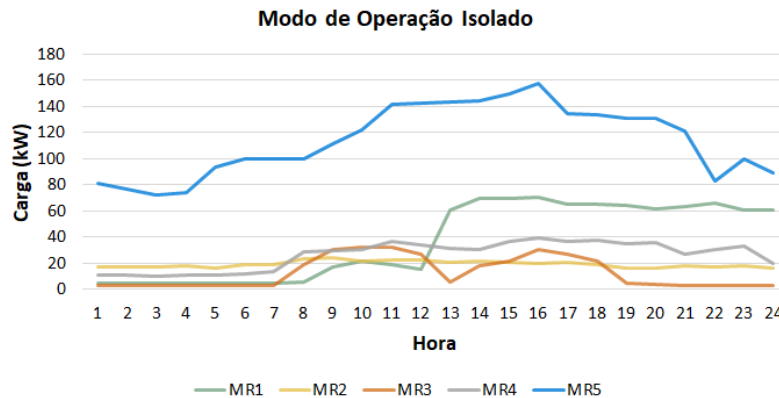


Figura 28 - Perfil de carga para cada MR no modo de operação normal



**Figura 29 - Perfil de carga para cada MR no modo de operação isolado**

Analisando as duas figuras anteriores, referentes ao perfil de carga para cada MR no modo de operação normal (Figura 28) e no modo de operação isolado (Figura 29), verifica-se que a MR1 e a MR5 apresentam maior perfil de consumo em relação às restantes MR. A MR5 apresenta um consumo elevado nomeadamente no período diurno, tendo também um consumo significativo no restante tempo, em comparação com as restantes MR. A MR1 também tem um consumo elevado, nomeadamente a partir do instante 13 (h=13) até ao final do dia. As MR2, MR3 e MR4 têm um perfil de consumo relativamente mais baixo em relação às MR1 e MR5. As MR2 e MR4 têm um perfil de consumo mais regular ao longo do dia. A MR3 é a microrrede com menor perfil de consumo, sendo mais elevado do instante 8 (h=8) ao instante 12 (h=12) e do instante 14 (h=14) ao instante 18 (h=18).

### 8.1.2. Geração

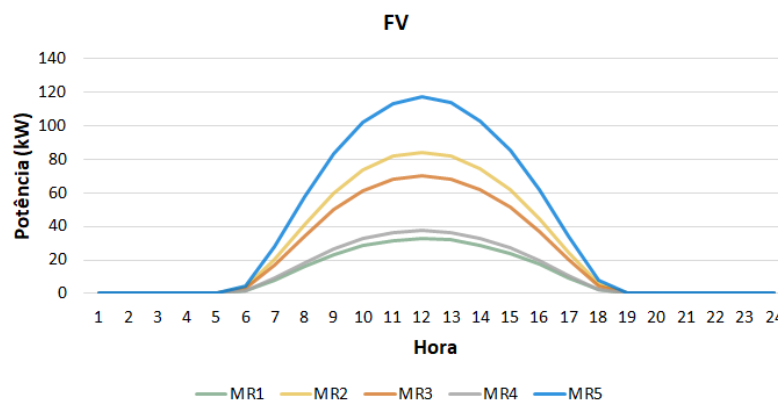
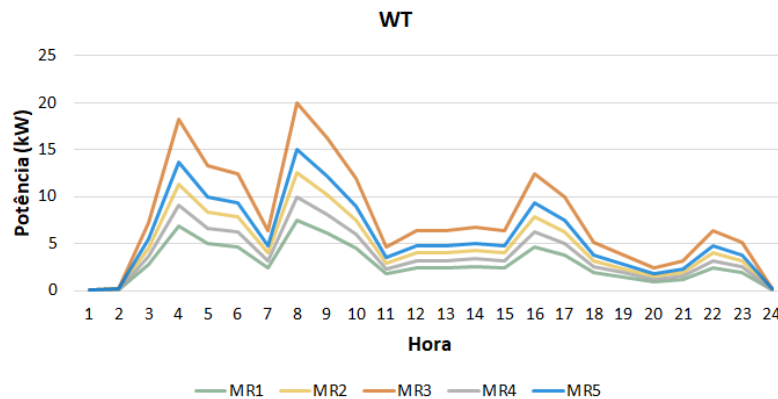
Relativamente à geração de energia, cada MR tem a sua capacidade de energia instalada por parte de painéis FV, WT e armazenamento de energia. A Tabela 9 apresenta os valores de potência instalada de tecnologia FV, WT, bem como a capacidade do ESS correspondente a cada MR.



**Tabela 9 - Geração de energia em cada MR**

MR	FV (kWp)	WT (kW)	ESS (kWh)
MR1	37,1	24	$\cong 60$
MR2	95,4	40	$\cong 135$
MR3	79,5	64	$\cong 140$
MR4	42,4	32	$\cong 70$
MR5	132,5	48	$\cong 180$

A geração de energia hora a hora para cada MR foi determinada através dos valores horários referentes à irradiação solar, temperatura de ar e velocidade do vento. As Figura 30 e Figura 31 apresentam a quantidade de energia gerada pelos sistemas FV e WT instalados em cada MR, para cada hora do dia. A Figura 32 apresenta uma estimativa da quantidade de energia armazenada no ESS para cada MR.

**Figura 30 - Potência gerada a partir de painéis FV em cada MR****Figura 31 - Potência gerada a partir de WT em cada MR**

Através da análise das duas figuras anteriores, verifica-se que todas as MR em estudo têm maioritariamente geração de energia proveniente de painéis FV. Através da Figura 30 é possível visualizar a curva característica da produção de energia por parte da tecnologia fotovoltaica, durante um dia com condições favoráveis, céu limpo. É também possível visualizar que a MR5 tem uma enorme produção de energia através de painéis FV em relação as restantes MR. Isto deve-se ao facto de ser a MR com maior capacidade instalada de painéis FV, uma vez que também é a MR com maior perfil de consumo ao longo do dia. Relativamente a produção de energia eólica (Figura 31) verifica-se que a capacidade instalada é muito inferior à tecnologia fotovoltaica, devido a não haver condições tão favoráveis. Analisando a Figura 31 também é possível verificar que a MR3 é a microrrede com maior produção de energia eólica durante o dia, seguindo-se a MR5. No entanto, nas restantes MR a produção de energia eólica não difere muito.

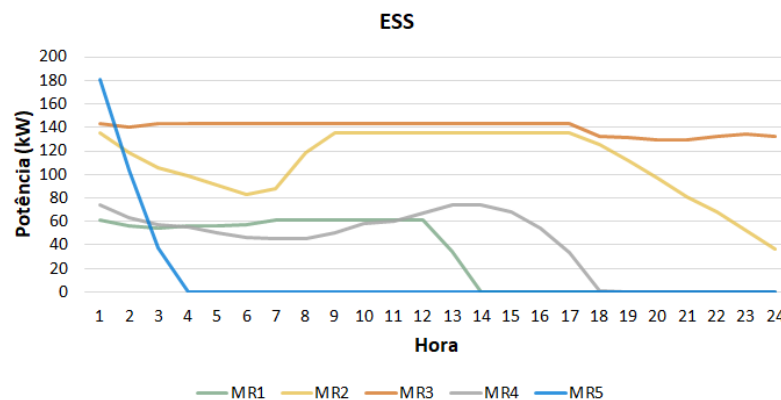


Figura 32 - Potência armazenada no ESS em cada MR

A Figura 32 consiste numa estimativa da evolução do ESS, tendo em conta a geração e consumos de energia de cada uma das MR. Esta estimativa parte do princípio de que o ESS de cada MR está totalmente carregado no início da avaliação da cooperação entre MR.

## 8.2. Algoritmo

O algoritmo desenvolvido permite que as várias MR em estudo realizem a troca de energia, a fim de compensar os períodos em que uma ou mais MR necessitam de fornecimento de energia. Assim, o excesso de energia de algumas MR (geração superior ao próprio consumo) permite alimentar consumos de outras MR assegurando a operação autónoma das múltiplas MR, *i.e.*, operação das MMR quando desconectadas da rede de distribuição principal (rede pública). O *script Matlab* permite determinar o balanço energético das MMR, assim como de cada MR, para cada hora do dia. Na Figura 33 é apresentado o fluxograma do algoritmo desenvolvido.

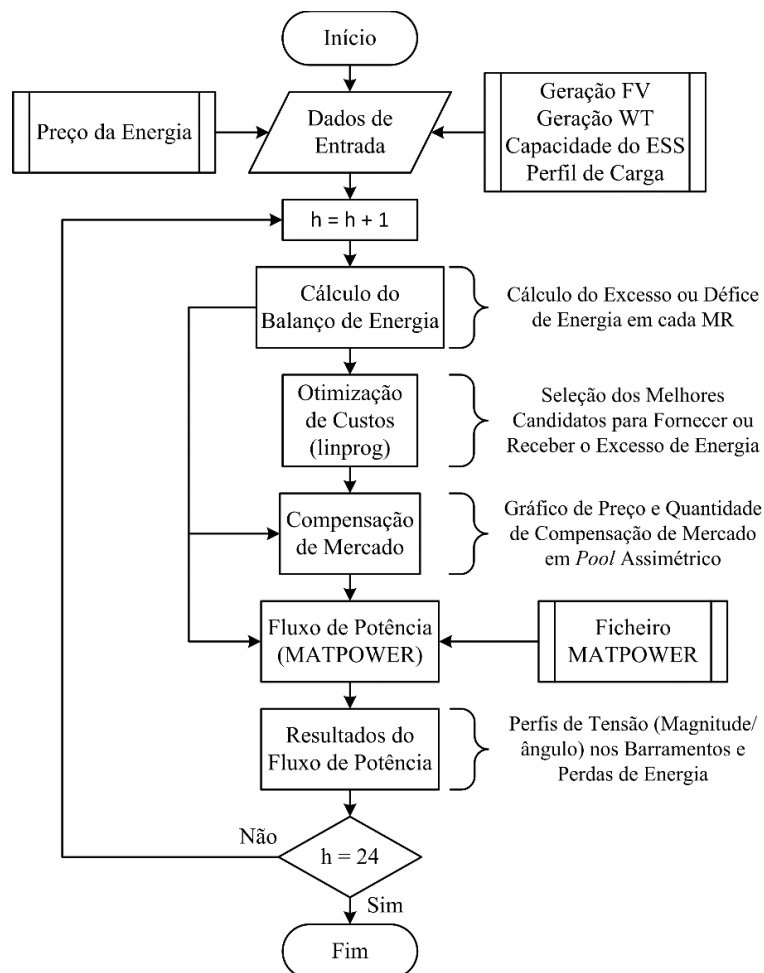


Figura 33 - Fluxograma do algoritmo para o modelo 1 e modelo 2

O balanço de energia de cada MR em estudo é determinado com base nos dados de entrada disponíveis para cada empresa. Os dados de entrada incluem a geração de energia FV, WT, capacidade do ESS, o consumo de energia, bem como o preço de energia (€/kWh) correspondente a cada MR para vender ou comprar o excesso de energia. Como referido anteriormente, a compensação de mercado (*Market Clearing*) pode seguir três modelos diferentes:

- **Modelo 1 (Ofertas de Venda)** – Este primeiro modelo consiste em ofertas de venda em *pool* assimétrico efetuadas por MR com excesso de energia. Cada MR define um preço específico para a sua quantidade de energia (em excesso face ao seu consumo). As ofertas das MR com excesso de energia são classificadas por ordem de mérito crescente do preço de energia, como representado na Figura 34. Neste modelo, as MR apenas garantem o fornecimento das suas cargas cruciais, correspondendo ao seu consumo mínimo de energia. No caso do excesso de energia total não ser suficiente para atender o consumo total de energia, então o deslastre de carga (*Load Shedding*) será aplicado às MR com défice de energia de maneira proporcional.

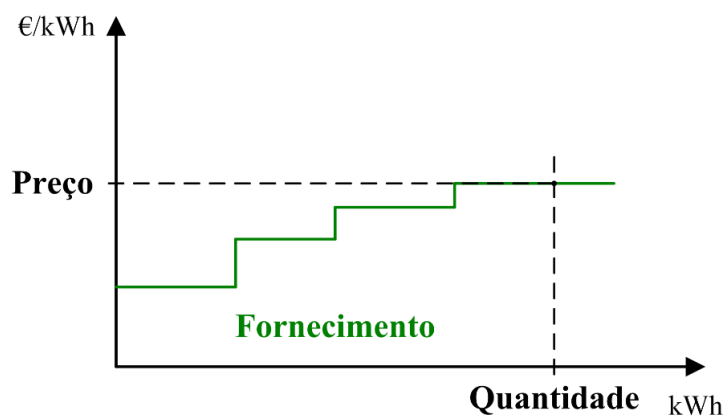


Figura 34 - Ofertas de venda classificadas por ordem de mérito crescente do preço de energia

- **Modelo 2 (Ofertas de compra)** – O modelo 2 consiste em ofertas de compra em *pool* assimétrico efetuadas por MR com défice de energia. Cada MR define um preço específico para a sua quantidade de défice de energia (procura de energia/consumo ou demanda). As ofertas das MR com défice de energia são classificadas por ordem de mérito decrescente do preço de energia, como representado na Figura 35. Neste modelo, as MR também devem garantir o fornecimento das suas cargas cruciais,

atendendo ao seu consumo mínimo de energia. No caso do excesso de energia total não ser suficiente para atender o consumo total de energia, o excesso de energia é transacionado com as MR que oferecem o preço mais alto (por essa quantidade de energia).

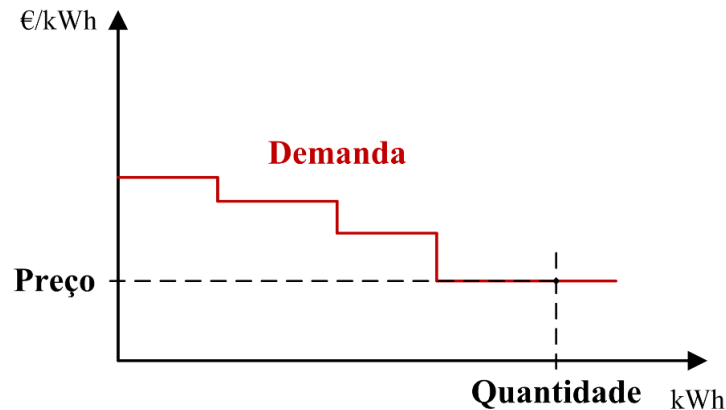


Figura 35 - Ofertas de compra classificadas por ordem de mérito decrescente do preço de energia

- Modelo 3 (Ofertas de venda e compra)** – É um modelo com duas etapas, baseado na aplicação do Modelo 1 e do Modelo 2 de forma sequencial. Assim, o Modelo 3 consiste num modelo híbrido face aos dois modelos anteriores, consistindo em ofertas de venda e/ou compra em *pool* assimétrico efetuadas por MR com excesso ou défice de energia. Assim, a primeira etapa consiste na aplicação do Modelo 1 e no caso de o excesso de energia total exceder o défice total de energia segue-se a segunda etapa (Modelo 2), em que cada MR estabelece um preço para o excesso de energia não utilizado, a fim de aumentar o seu consumo de energia para além do fornecimento das suas cargas cruciais (e assim tentar atender à procura de energia normal). Como no modelo anterior, as ofertas de compra são classificadas por ordem de mérito decrescente do preço de energia, em que o excesso de energia é trocado com as MR que oferecem o preço mais alto, como representado na Figura 36. Desta forma, qualquer excesso de energia não utilizado não é desperdiçado, dependendo do ciclo de operação de cada MR e se os ESS podem ou não ser carregados.

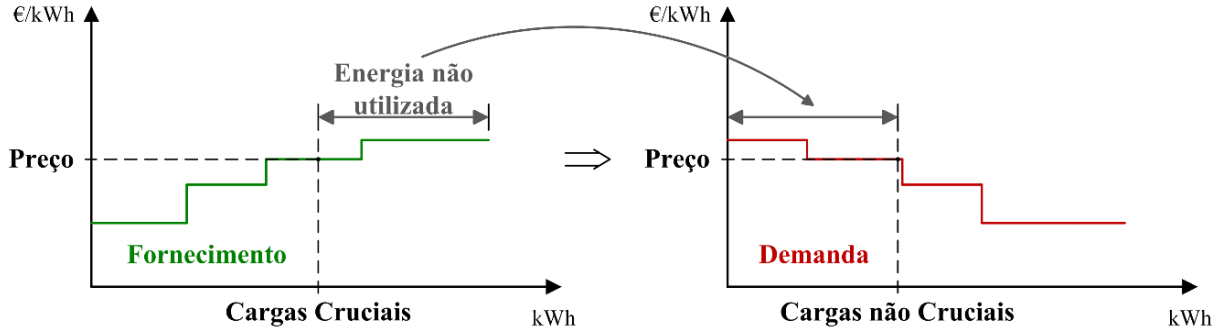


Figura 36 - Ofertas de venda e compra classificadas por ordem crescente e decrescente do preço de energia

As próximas etapas do *script Matlab* usam a função “*linprog*” e a *toolbox open-source* “*MATPOWER*” que são explicados com maior detalhe nas seguintes secções para os três modelos de compensação de mercado.

### 8.2.1. Função *Linprog*

O algoritmo foi desenvolvido com base no uso da função “*linprog*” em *Matlab*, que permite encontrar uma solução ideal para um problema linear específico definido por restrições de desigualdade, restrições de igualdade e limites. Este algoritmo tem como objetivo principal otimizar o custo de energia transacionada entre as MR individuais.

#### A. Modelo 1 – Ofertas de Venda

Neste modelo, se uma ou mais MR necessitarem do fornecimento de energia por parte das MR vizinhas, a função selecionará os melhores candidatos para fornecer o seu excesso de energia de acordo com os seus respetivos preços no mercado de energia. Por outras palavras, uma ou mais MR são selecionadas para atender o défice total de energia, correspondente ao conjunto de MR, ao menor custo possível. A função objetivo do problema para este modelo é dada pela expressão (5):

$$\min \sum_{i=1}^n (\Delta P_{Gi_{FV}} + \Delta P_{Gi_{WT}} + \Delta P_{Gi_{ESS}}) \times C_{Gi} + P_{Cd} \times C_d \quad (5)$$

onde  $\Delta P_{Gi_{FV}}$ ,  $\Delta P_{Gi_{WT}}$  e  $\Delta P_{Gi_{ESS}}$  são a quantidade de excesso de energia gerado por painéis FV, WT e energia armazenada no ESS para cada MR,  $C_{Gi}$  é o respetivo custo de energia, e  $P_{Cd}$  é a quantidade de energia sujeita ao deslastre de carga, associada a um alto custo  $C_d$ . Este alto custo é uma penalidade associada a qualquer incumprimento no fornecimento de energia, sendo necessário salvaguardar cada oferta de mercado feita pelas MR com excesso de geração. E  $n$  é o número de MR na cooperação. Esta função está sujeita às seguintes restrições de desigualdade, expressão (6):

$$\Delta P_{Gi_{FV}} + \Delta P_{Gi_{WT}} + \Delta P_{Gi_{ESS}} \leq \Delta P_{Gi_{Total}} \quad , i = 1, \dots, n \quad (6)$$

onde  $\Delta P_{Gi_{Total}}$  é a quantidade total de excesso de energia disponível em cada MR, que pode ser determinada pela soma de todo o excesso de energia gerada por painéis FV, WT e energia armazenada no ESS.

A restrição de igualdade do problema é dada pela expressão (7).

$$\sum_{i=1}^n (\Delta P_{Gi_{FV}} + \Delta P_{Gi_{WT}} + \Delta P_{Gi_{ESS}}) + P_{Cd} = \Delta P_{C_{Total}} \quad (7)$$

onde  $\Delta P_{C_{Total}}$  é a quantidade total de energia consumida por todas as MR participantes.

Por fim, a função objetivo também é limitada por limites superior e inferior, expressão (8):

$$\begin{aligned} 0 \leq \begin{bmatrix} \Delta P_{Gi_{FV}} \\ \Delta P_{Gi_{WT}} \\ \Delta P_{Gi_{ESS}} \end{bmatrix} &\leq \begin{bmatrix} P_{Gi_{FV}} \\ P_{Gi_{WT}} \\ P_{Gi_{ESS}} \end{bmatrix} \quad , i = 1, \dots, n \\ 0 \leq P_{Cd} &\leq \Delta P_{C_{Total}} \end{aligned} \quad (8)$$

onde  $P_{Gi_{FV}}$ ,  $P_{Gi_{WT}}$  e  $P_{Gi_{ESS}}$  são a quantidade de energia gerada por painéis FV, WT e energia armazenada no ESS para cada MR. Estes valores são importados diretamente da base de

dados de cada MR. A quantidade de deslastre de carga não pode exceder a quantidade total de energia consumida por todas as MR e tem de ser maior ou igual a zero.

A solução obtida da função “*linprog*” corresponde à quantidade de energia excedente fornecida por uma ou mais MR com o menor custo de energia, tendo de haver pelo menos uma MR com défice de energia. Estes valores também são necessários para atualizar o estado do ESS de cada MR para o próximo instante. A solução também inclui a quantidade de carga necessária a ser deslastrada quando a quantidade total de défice de energia for maior que a quantidade total de excesso de energia das MR pertencentes à cooperação. Deste modo, são obtidos os gráficos de preços e quantidades de compensação de mercado no *pool* assimétrico para ofertas de venda usando a quantidade de deslastre de carga, excesso de energia e défice de energia.

### B. Modelo 2 – Ofertas de Compra

Neste modelo, a função “*linprog*” selecionará os melhores candidatos para receber o excesso de energia de acordo com os seus respetivos preços no mercado de energia. Por outras palavras, uma ou mais MR são selecionadas para receber o excesso de energia com base nos preços mais elevados oferecidos no mercado. A função objetivo do problema para este modelo é dada pela expressão (9):

$$\max \sum_{i=1}^n \Delta P_{Ci} \times C_{Ci} - P_{G_{exc}} \times C_{exc} \quad (9)$$

onde  $\Delta P_{Ci}$  é a quantidade de défice de energia necessária para fornecer as cargas cruciais em cada MR,  $C_{Ci}$  é o respetivo custo de energia, e  $P_{G_{exc}}$  é a quantidade de energia excedente que também está associada a um alto custo  $C_{exc}$  como penalidade. E  $n$  é o número de MR na cooperação. Esta função está sujeita às seguintes restrições de desigualdade, expressão (10):

$$\Delta P_{Ci} \leq \Delta P_{Ci_{Total}} \quad , i = 1, \dots, n \quad (10)$$



onde  $\Delta P_{CiTotal}$  é a quantidade total de energia necessária para fornecer todas as cargas cruciais em cada MR.

A restrição de igualdade do problema é dada pela expressão (11).

$$\sum_{i=1}^n \Delta P_{Ci} - P_{G_{exc}} = \Delta P_{G_{Total}} \quad (11)$$

onde  $\Delta P_{G_{Total}}$  é a quantidade total de excesso de energia gerada disponível de todas as MR da cooperação, que pode ser determinada através da soma de todo o excesso de energia gerada por painéis FV, WT e energia armazenada no ESS.

Por último, a função objetivo também é limitada por limites superior e inferior, expressão (12):

$$\begin{aligned} 0 &\leq \Delta P_{Ci} \leq P_{Ci} \\ 0 &\leq P_{G_{exc}} \leq \Delta P_{G_{Total}} \end{aligned} , i = 1, \dots, n \quad (12)$$

onde  $P_{Ci}$  é a quantidade de energia consumida pelas cargas cruciais de cada MR. Estes valores são importados diretamente da base de dados de cada MR. A quantidade de energia excedente não pode ser superior à quantidade total de excesso de energia gerada por todas as MR da cooperação e tem de ser maior ou igual a zero.

A solução obtida da função “*linprog*” corresponde à quantidade de energia excedente recebida por uma ou mais MR, tendo de haver pelo menos uma MR com excesso de energia. Estes valores também são necessários para atualizar o estado do ESS de cada MR para o próximo instante. A solução também inclui a quantidade de energia excedente quando a quantidade total de excesso de energia é maior que a quantidade total de défice de energia em todas as MR da cooperação. Deste modo, são obtidos os gráficos relativos a preços e quantidades de compensação de mercado (*pool* assimétrico) para ofertas de compra usando a quantidade de energia excedente, *i.e.*, excesso de energia e défice de energia.

### C. Modelo 3 – Ofertas de Venda e Compra

Neste modelo, o algoritmo segue a mesma estrutura do modelo 1, selecionando os melhores candidatos para fornecer o seu excesso de energia com base nos seus respectivos preços de mercado de modo a atender ao déficit de energia de todas as MR participantes na cooperação ao menor custo possível. Contudo, se a quantidade de energia excedente for superior à quantidade de déficit de energia de todas as MR, o algoritmo segue a mesma estrutura do modelo 2. Deste modo, uma ou mais MR recebem o excesso de energia de acordo com a quantidade de energia necessária para atender a sua procura de energia normal.

Assim, a formulação matemática deste modelo consiste nas expressões (5) a (8) para consumos mínimos e nas expressões (9) a (12) para consumos normais.

#### 8.2.2. *Matpower*

O pacote *open-source* *MATPOWER* é usado no algoritmo para a análise do fluxo de potência e determinar as perdas da rede em estudo. O *MATPOWER* é um pacote *open-source* gratuito de linguagem *Matlab* (*M-files*) que permite resolver problemas de simulação e otimização de sistemas de energia em estado estacionário, como o fluxo de energia (*power flow* - PF), continuação de fluxo de energia (*continuation power flow* - CPF), fluxo de energia ótimo extensível (*extensible optimal power flow* - OPF), compromisso de unidade/pré-despacho (*unit commitment* - UC) e OPF/UC estocástico e seguro de vários intervalos. Neste caso de estudo, o ficheiro de caso *MATPOWER* padrão foi usado como modelo e adaptado de acordo com os parâmetros da rede em estudo, de forma a simular o fluxo de energia e calcular as perdas na rede. O ficheiro *MATPOWER* retorna uma estrutura designada de “*mpc*” que contém diferentes campos, como “*baseMVA*”, “*bus*”, “*gen*”, “*branch*” e “*gencost*”. No algoritmo desenvolvido, as matrizes correspondentes a cada campo são atualizadas a cada instante. Os valores associados a estes campos incluem: potência ativa e reativa em cargas e geradores determinados pelo algoritmo ou importados da base de dados para cada barramento da rede.

### 8.3. Resultados

Nesta secção são apresentados os resultados do fluxo de potência obtidos pelo algoritmo, bem como os gráficos de preço e quantidade de compensação de mercado para cada modelo assimétrico em dois instantes de tempo distintos. Neste estudo, considera-se que cada MR industrial integra uma compensação de energia reativa para evitar o pagamento da respetiva fatura. Deste modo, o consumo de energia reativa de cada MR corresponde a um fator de potência de 0,95 ( $\cos\varphi \geq 0,95$  ou  $\tan\varphi \leq 0,3$ ).

#### 8.3.1. Modelo 1 - Ofertas de Venda

Os gráficos de preço e quantidade de compensação de mercado para ofertas de venda correspondentes aos instantes de tempo  $h=15$  e  $h=22$  são apresentados na Figura 37 e na Figura 38. Os resultados do fluxo de potência para o instante de tempo  $h=15$  são apresentados nas Tabela 10 e Tabela 11, enquanto os resultados do fluxo de potência para o instante de tempo  $h=22$  são apresentados nas Tabela 12 e Tabela 13. Estas tabelas incluem os valores de magnitude e ângulo de fase para tensão, os valores de geração e carga em cada barramento, bem como as respetivas perdas associadas.

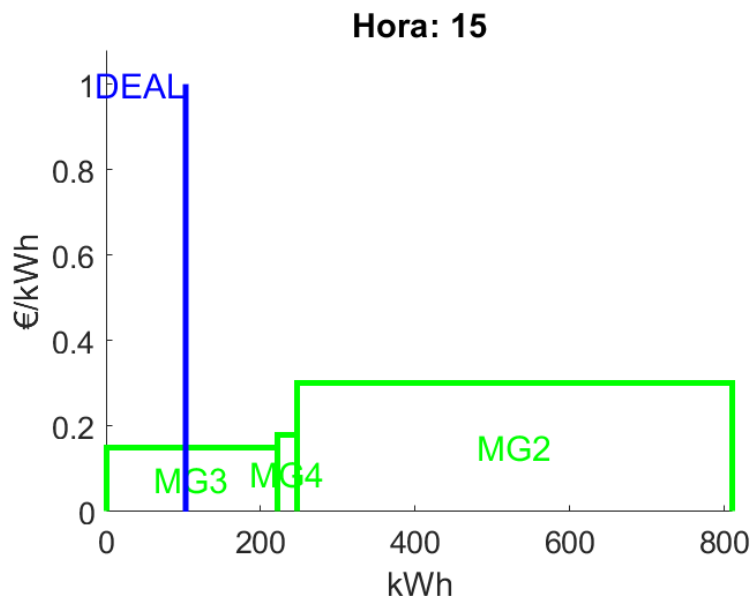


Figura 37 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante  $h=15$

Tabela 10 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=15

Barramento	Tensão		Geração		Carga	
	Mag (pu)	Âng (pu)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1,001	0,310	-	-	-	-
2	1,001	0,311	-	-	-	-
3	1,000	0,000	26,45	11,82	69,88	20,96
4	1,001	0,312	-	-	-	-
5	1,000	0,312	21,01	-3,15	21,01	6,30
6	1,001	0,313	-	-	-	-
7	1,000	1,050	124,89	-2,39	21,84	6,55
8	1,001	0,296	-	-	-	-
9	1,000	0,296	36,69	6,14	36,69	11,01
10	1,000	0,281	-	-	-	-
11	1,000	-0,146	90,48	44,56	150,04	45,01

Tabela 11 - Trânsitos de potências nos ramos para o instante de tempo h=15

Ramo		Do Barramento		Para o Barramento		Perdas	
Do Barramento	Para o Barramento	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
1	2	-10,37	-2,90	10,37	-5,40	0,000	0,00
2	6	-53,79	-4,00	53,80	-7,07	0,002	0,00
1	4	-49,26	-1,16	49,26	-7,14	0,001	0,00
4	6	-49,26	-2,32	49,26	-3,22	0,001	0,00
1	8	59,62	4,06	-59,59	-4,91	0,031	0,02
8	10	59,59	0,04	-59,56	-0,90	0,031	0,02
2	3	43,43	9,39	-43,43	-9,15	0,000	0,25
4	5	0,00	9,46	-0,00	-9,45	0,000	0,01
6	7	-103,05	10,28	103,05	-8,94	0,000	1,34
8	9	-0,00	4,87	0,00	-4,87	0,000	0,00
10	11	59,56	0,90	-59,56	-0,45	0,000	0,44

Como observado no gráfico de preço e quantidade de compensação de mercado para ofertas de venda (Figura 37), três ofertas de venda são representadas pelas três MR com excesso de energia no instante de tempo (h=15). A linha vertical de cor azul representa o total de déficit de energia que corresponde à soma do déficit de energia das duas MR restantes. A Tabela 10

mostra a quantidade de energia ativa e reativa gerada e consumida por cada MR, bem como os respetivos valores de magnitude e ângulo de tensão. É possível também verificar que a tensão dos barramentos está dentro dos valores normais (aproximadamente 1 pu). Analisando a Tabela 11 verifica-se que a “MR1” e “MR5” correspondem às duas MR com déficit de energia, sendo fornecidas pela “MR3” com perdas de transmissão desprezáveis. O preço de energia transacionada corresponde a 0,15 €/kWh, perfazendo um montante de 15,4575 € ( $103,05 \times 1 \times 0,15$ ). Neste caso, verifica-se que há excedente de energia que deve ser gerida por cada uma das respetivas MR, como por exemplo alimentarem mais cargas, recarregar o ESS se possível ou alimentar cargas presentes na mesma rede de distribuição.

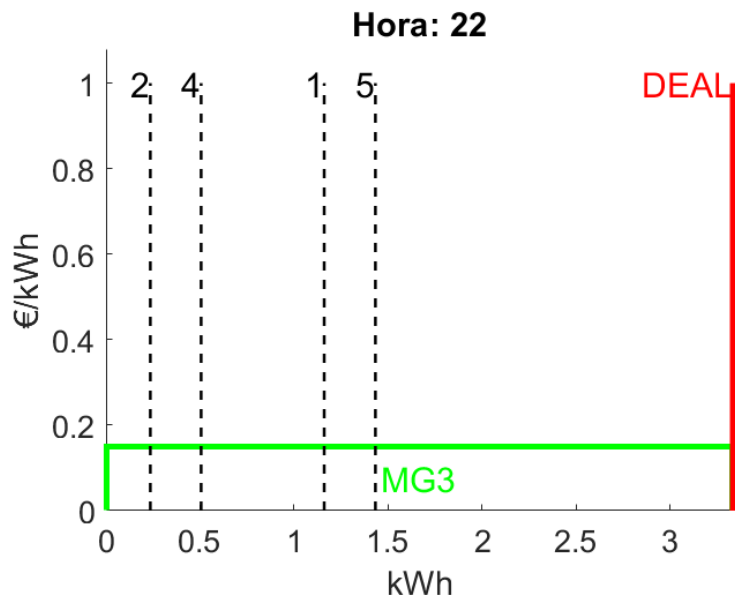


Figura 38 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante h=22

Tabela 12 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=22

Barramento	Tensão		Geração		Carga	
	Mag (pu)	Âng (pu)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1,001	0,008	-	-	-	-
2	1,001	0,008	-	-	-	-
3	1,000	0,000	2,39	-6,21	3,55	1,06
4	1,001	0,008	-	-	-	-
5	1,000	0,007	3,97	-6,01	4,21	1,26
6	1,001	0,008	-	-	-	-
7	1,000	0,032	6,36	-6,38	3,02	0,91
8	1,001	0,014	-	-	-	-
9	1,000	0,010	3,18	-5,58	3,69	1,11
10	1,001	0,016	-	-	-	-
11	1,000	0,006	4,77	-4,50	6,20	1,86

Tabela 13 - Trânsitos de potência nos ramos para o instante de tempo h=22

Ramo		Do Barramento		Para o Barramento		Perdas	
Do	Para o	P	Q	P	Q	P	Q
Barramento	Barramento	(kW)	(kVAr)	(kW)	(kVAr)	(kW)	(kVAr)
1	2	-0,46	-6,27	0,46	-2,03	0,000	0,00
2	6	-1,62	-5,26	1,62	-5,80	0,000	0,00
1	4	-1,48	-5,05	1,48	-3,24	0,000	0,00
4	6	-1,71	-4,04	1,71	-1,49	0,000	0,00
1	8	1,94	11,32	-1,94	-12,19	0,001	0,00
8	10	1,43	5,50	-1,43	-6,37	0,000	0,00
2	3	1,16	7,28	-1,16	-7,28	0,000	0,01
4	5	0,24	7,28	-0,24	-7,28	0,000	0,01
6	7	-3,33	7,29	3,33	-7,29	0,000	0,01
8	9	0,51	6,69	-0,51	-6,69	-0,000	0,01
10	11	1,43	6,37	-1,43	-6,36	0,000	0,01

Através da análise do gráfico de preço e quantidade de compensação de mercado verifica-se que para este instante de tempo (h=22) existe apenas uma oferta de venda, como apresentado na Figura 38. Neste caso, é aplicado o deslastre de cargas às MR com déficit de energia, uma vez que o total de excesso de energia é inferior ao total de déficit de energia. A linha vertical de cor vermelha representa o total de déficit de energia posteriormente ao deslastre de carga,

correspondendo assim ao total de excesso de energia. Deste modo as MR com défice de energia estão sujeitas a uma diminuição de carga proporcional à sua quantidade de défice de energia, representada pelas linhas verticais tracejadas. A Tabela 12 mostra a quantidade de energia ativa e reativa gerada e consumida por cada MR, bem como os respetivos valores de magnitude e ângulo de tensão. É possível também verificar que a tensão dos barramentos está dentro dos valores normais (aproximadamente 1 pu). Analisando a Tabela 13 é possível visualizar que todas as MR com défice de energia são fornecidas pela “MR3” com perdas de transmissão desprezáveis. A tarifa neste instante de tempo mantém o valor de 0,15 €/kWh, perfazendo um montante de 0,4995 € ( $3,33 \times 1 \times 0,15$ ).

Os dois instantes analisados anteriormente ( $h=15$  e  $h=22$ ) enquadram-se num conjunto de simulações de 24 períodos. A Figura 39 mostra o resumo hora a hora para os 24 períodos do modelo 1, em que a troca de energia no grupo de MR é realizada através de ofertas de venda para que todas a MR garantam os seus consumos mínimos. A figura apresenta as quantidades de carga necessária para garantir os consumos mínimos (Carga - coluna azul), energia gerada (Gen - coluna laranja), energia excedente (Exc - coluna amarela) e a quantidade necessária de deslastre de carga (Des - coluna cinzenta).

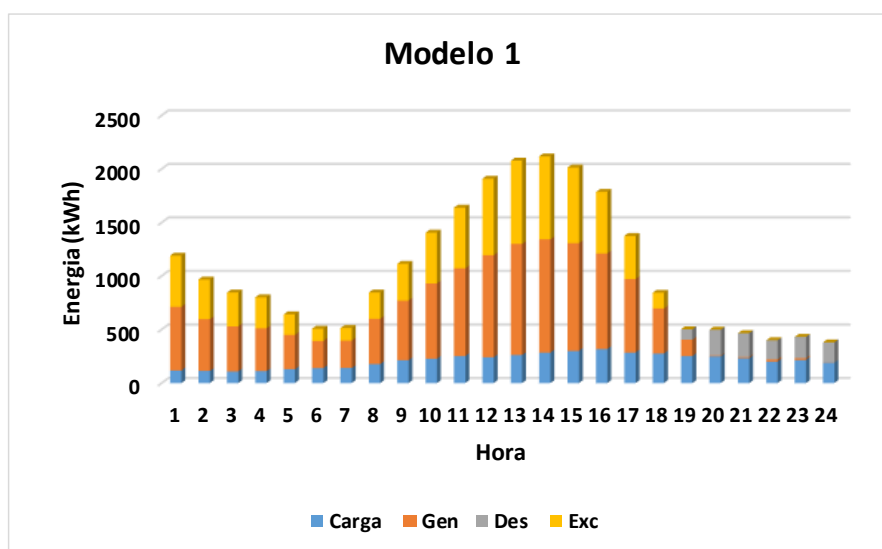


Figura 39 - Resultados horários obtidos a partir do modelo 1

Analisando a Figura 39, verifica-se que o grupo de MR consegue satisfazer as suas cargas cruciais em 75% do tempo. Respetivamente à quantidade de carga os seus perfis são mais

elevados do instante 10 (h=10) ao instante 21 (h=21). O período onde existe maior necessidade de carga corresponde ao instante 16 (h=16). No entanto, a quantidade de energia gerada nesse instante é suficiente para alimentar a respetiva carga. Relativamente à energia gerada, as maiores quantidades de produção são do instante 10 (h=10) ao instante 17 (h=17), devido à produção de energia ser, quase na totalidade, através da tecnologia fotovoltaica. Contudo, a produção de energia é praticamente nula do instante 20 (h=20) ao instante 24 (h=24). Por último, a quantidade de energia gerada do instante 1 (h=1) ao instante 18 (h=18) é superior à quantidade de carga necessária para garantir os consumos mínimos na cooperação entre MR, existindo excesso de energia nestes instantes. Nestes instantes, as MR com excesso de energia devem gerir a energia não usada, como por exemplo alimentarem mais cargas, recarregar o ESS se possível ou alimentar cargas presentes na rede de distribuição do grupo das MR. Porém, do instante 19 (h=19) ao instante 24 (h=24) a quantidade de energia gerada não satisfaz a quantidade de carga necessária para os consumos mínimos, havendo a necessidade de deslastre de carga por parte de todas as MR do *cluster* com défice de energia, sendo o período mais crítico no instante 20 (h=20).

A Figura 40 apresenta os preços (€/kWh) praticados no comércio de energia do mercado interno da cooperação entre MR. O preço de energia é definido com base na interseção entre a quantidade de défice de energia possível alimentar e a oferta de venda.

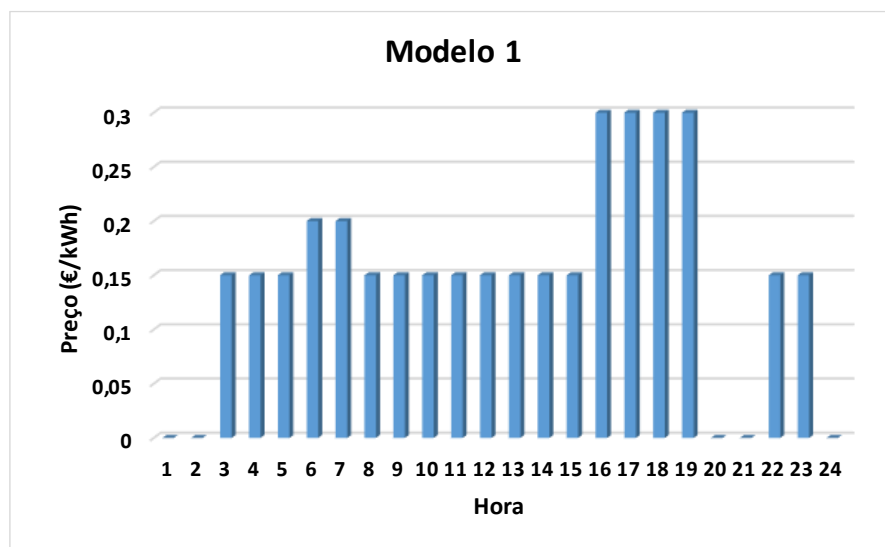


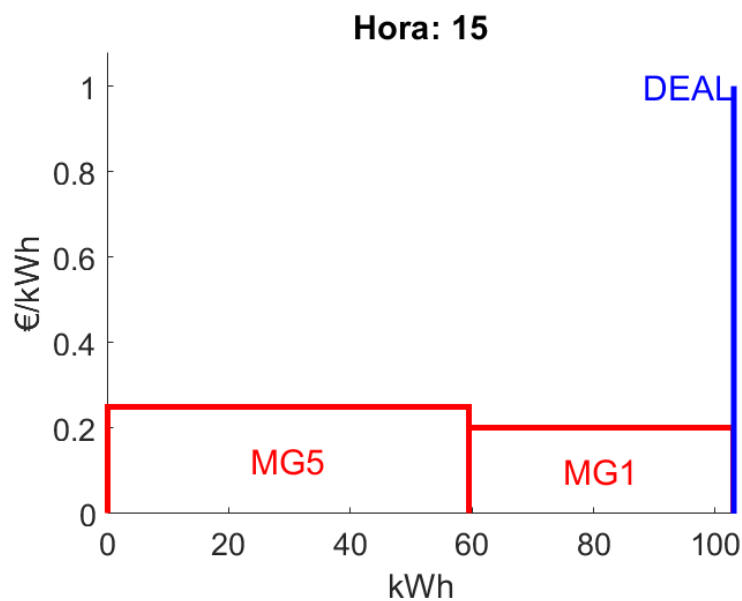
Figura 40 - Preços horários obtidos do modelo 1



A Figura 40 mostra que existe comércio de energia em quase todos os instantes. No entanto, existem cinco instantes em que não existe troca de energia. Nos instantes 1 ( $h=1$ ) e 2 ( $h=2$ ), não existe comércio de energia pelo facto de (nestes dois instantes) todas as MR da cooperação terem excesso de energia. Contudo, nos instantes 20 ( $h=20$ ), 21 ( $h=21$ ) e 24 ( $h=24$ ), não existe comércio de energia dado que todas as MR da cooperação têm défice de energia, tornando impossível a cooperação entre MR. Neste modelo, são praticados três preços de energia diferentes ao longo dos 24 períodos. Os preços de energia são de 0.15 €/kWh, 0.2 €/kWh e 0.3 €/kWh. Nos instantes de 3 ( $h=3$ ) a 5 ( $h=5$ ), de 8 ( $h=8$ ) a 15 ( $h=15$ ) e nos instantes 22 ( $h=22$ ) e 23 ( $h=23$ ) o preço de energia corresponde a 0.15 €/kWh. Nos instantes 6 ( $h=6$ ) e 7 ( $h=7$ ) o preço é de 0.2 €/kWh e dos instantes 16 ( $h=16$ ) a 19 ( $h=19$ ) é de 0.3 €/kWh. Na maioria dos instantes o preço da energia comercializada é de 0.15 €/kWh. Isto deve-se ao facto deste modelo ser baseado em ofertas de venda, em que a ordem das ofertas é classificada por ordem de mérito ascendente, o que neste caso corresponde à “MR3”, pelo facto de ter a oferta de venda a um preço mais baixo e de ter a quantidade de energia necessária para satisfazer o défice de energia no grupo na maioria dos instantes.

### 8.3.2. Modelo 2 - Ofertas de Compra

Os gráficos de preço e quantidade de compensação de mercado para ofertas de venda correspondentes aos instantes de tempo  $h=15$  e  $h=22$  são apresentados na Figura 41 e na Figura 42. Os resultados do fluxo de potência para o instante de tempo  $h=15$  são apresentados nas Tabela 14 e Tabela 15, enquanto os resultados do fluxo de potência para o instante de tempo  $h=22$  são apresentados nas Tabela 16 e Tabela 17. Estas tabelas incluem os valores de magnitude e ângulo de fase para tensão, os valores de geração e carga em cada barramento, bem como as respetivas perdas associadas.



**Figura 41 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante h=15**

**Tabela 14 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=15**

Barramento	Tensão		Geração		Carga	
	Mag (pu)	Âng (pu)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
<b>1</b>	1,001	0,310	-	-	-	-
<b>2</b>	1,001	0,311	-	-	-	-
<b>3</b>	1,000	0,000	26,45	11,82	69,88	20,96
<b>4</b>	1,001	0,312	-	-	-	-
<b>5</b>	1,000	0,312	21,01	-3,15	21,01	6,30
<b>6</b>	1,001	0,313	-	-	-	-
<b>7</b>	1,000	1,050	124,89	-2,39	21,84	6,55
<b>8</b>	1,001	0,296	-	-	-	-
<b>9</b>	1,000	0,296	36,69	6,14	36,69	11,01
<b>10</b>	1,000	0,281	-	-	-	-
<b>11</b>	1,000	-0,146	90,48	44,56	150,04	45,01

Tabela 15 - Trânsitos de potências nos ramos para o instante de tempo  $h=15$ 

Ramo		Do Barramento		Para o Barramento		Perdas	
Do	Para o	P	Q	P	Q	P	Q
Barramento	Barramento	(kW)	(kVAr)	(kW)	(kVAr)	(kW)	(kVAr)
1	2	-10,37	-2,90	10,37	-5,40	0,000	0,00
2	6	-53,79	-4,00	53,80	-7,07	0,002	0,00
1	4	-49,26	-1,16	49,26	-7,14	0,001	0,00
4	6	-49,26	-2,32	49,26	-3,22	0,001	0,00
1	8	59,62	4,06	-59,59	-4,91	0,031	0,02
8	10	59,59	0,04	-59,56	-0,90	0,031	0,02
2	3	43,43	9,39	-43,43	-9,15	0,000	0,25
4	5	0,00	9,46	-0,00	-9,45	0,000	0,01
6	7	-103,05	10,28	103,05	-8,94	0,000	1,34
8	9	-0,00	4,87	0,00	-4,87	0,000	0,00
10	11	59,56	0,90	-59,56	-0,45	0,000	0,44

Observando o gráfico de preço e quantidade de compensação de mercado para ofertas de compra apresentado na Figura 41, verifica-se que para este instante de tempo ( $h=15$ ) existem duas ofertas de compra correspondentes às MR com défice de energia. A linha vertical de cor azul representa o total de excesso de energia, que corresponde à soma do excesso de energia das restantes três MR com excesso de energia neste instante. Neste caso, o total de excesso de energia é igualado à quantidade de défice de energia, devido ao total de excesso de energia ser superior ao total de défice de energia. No entanto, esta situação resulta do facto de se ter considerado ofertas de compra apenas para as cargas cruciais (consumos mínimos), permitindo uma comparação direta com o modelo 1. Neste modelo o excesso de energia também deve ser gerido pelas respetivas MR, como por exemplo alimentarem mais cargas, recarregar o ESS se possível ou alimentar cargas presentes na mesma rede de distribuição. A Tabela 14 mostra a quantidade de energia ativa e reativa gerada e consumida por cada MR, bem como os respetivos valores de magnitude e ângulo de tensão. É possível também verificar que a tensão dos barramentos está dentro dos valores normais (aproximadamente 1 pu). Analisando a Tabela 15 verifica-se que a “MR1” e “MR5” correspondem às duas MR com défice de energia, sendo fornecidas pela “MR3” com perdas de transmissão desprezáveis. O preço de energia transacionada corresponde a 0,20 €/kWh, perfazendo um montante de 20,61 € ( $103,05 \times 1 \times 0,20$ ).

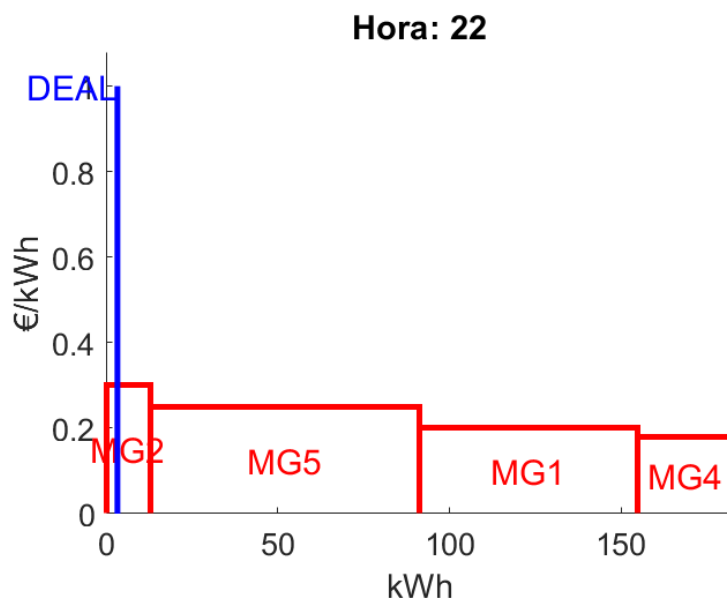


Figura 42 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante h=22

Tabela 16 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=22

Barramento	Tensão		Geração		Carga	
	Mag (pu)	Âng (pu)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1,001	0,000	-	-	-	-
2	1,001	-0,000	-	-	-	-
3	1,000	0,000	2,39	-6,50	2,38	0,72
4	1,001	0,000	-	-	-	-
5	1,000	-0,024	3,97	-5,01	7,31	2,19
6	1,001	0,000	-	-	-	-
7	1,000	0,024	6,36	-6,30	3,02	0,91
8	1,001	0,006	-	-	-	-
9	1,000	0,006	3,18	-5,79	3,18	0,95
10	1,001	0,009	-	-	-	-
11	1,000	0,009	4,77	-5,09	4,77	1,43

Tabela 17 - Trânsitos de potências nos ramos para o instante de tempo h=22

Ramo		Do Barramento		Para o Barramento		Perdas	
Do	Para o	P	Q	P	Q	P	Q
Barramento	Barramento	(kW)	(kVAr)	(kW)	(kVAr)	(kW)	(kVAr)
1	2	-0,56	-6,37	0,56	-1,93	0,000	0,00
2	6	-0,56	-5,29	0,56	-5,77	0,000	0,00
1	4	0,56	-5,17	-0,56	-3,13	0,000	0,00
4	6	-2,78	-4,08	2,78	-1,45	0,000	0,00
1	8	0,00	11,53	-0,00	-12,40	0,001	0,00
8	10	0,00	5,65	0,00	-6,52	0,000	0,00
2	3	-0,00	7,22	0,00	-7,21	0,000	0,01
4	5	3,33	7,21	-3,33	-7,20	-0,000	0,01
6	7	-3,33	7,22	3,33	-7,21	0,000	0,01
8	9	-0,00	6,75	0,00	-6,75	0,000	0,01
10	11	-0,00	6,52	0,00	-6,52	0,000	0,01

Observando o gráfico de preço e quantidade de compensação de mercado para ofertas de compra apresentado na Figura 42, verifica-se que existe quatro ofertas de compra correspondentes às quatro MR com défice de energia neste instante de tempo (h=22). A linha vertical de cor azul representa o total de excesso de energia correspondente à restante MR, sendo a única com excesso de energia neste instante de tempo. Neste caso, apenas uma MR recebe a quantidade de energia excedente disponível porque o total de excesso de energia é inferior ao total de défice de energia. A Tabela 16 mostra a quantidade de energia ativa e reativa gerada e consumida por cada MR, bem como os respetivos valores de magnitude e ângulo de tensão. É possível também verificar que a tensão dos barramentos está dentro dos valores ideais (aproximadamente 1 pu). Analisando a Tabela 17 verifica-se que a “MR2” é fornecida pela “MR3” com perdas de transmissão desprezáveis. Neste instante, o preço de energia transacionada corresponde a 0,30 €/kWh, perfazendo um montante de 0,99 € ( $3,33 \times 1 \times 0,30$ ). Em relação ao modelo anterior, verifica-se um significativo aumento de tarifa, devido ao modelo se basear em ofertas de compra.

Os dois instantes analisados anteriormente (h=15 e h=22) enquadram-se num conjunto de simulações de 24 períodos. A Figura 43 mostra o resumo hora a hora para os 24 períodos do modelo 2, em que a troca de energia na cooperação de MR é realizada através de ofertas de compra para que as MR garantam os seus consumos mínimos. A figura apresenta as

quantidades de carga necessária para garantir os consumos mínimos (Carga - coluna azul), energia gerada (Gen - coluna laranja), energia excedente (Exc - coluna amarela) e a quantidade necessária de deslastre de carga (Des - coluna cinzenta). É importante referir que para este modelo o resumo hora a hora apresenta os mesmos resultados que o modelo 1, uma vez que os dados são os mesmos relativamente à energia, mudando apenas os preços em cada instante.

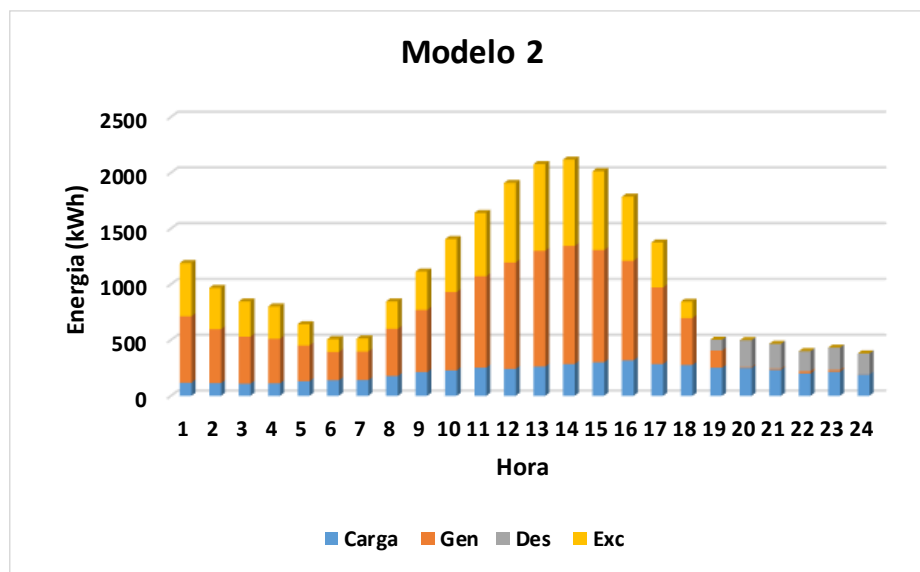


Figura 43 - Resultados horários obtidos a partir do modelo 2

Como no modelo 1, através da Figura 43 verifica-se que as MR conseguem satisfazer as suas cargas cruciais em 75% do tempo. O período onde existe maior necessidade de carga corresponde ao instante 16 ( $h=16$ ). No entanto, a quantidade de energia gerada nesse instante é suficiente para alimentar a respetiva carga. A quantidade de energia gerada do instante 1 ( $h=1$ ) ao instante 18 ( $h=18$ ) é superior à quantidade de carga necessária para garantir os consumos mínimos das MR, existindo excesso de energia nestes instantes. Nestes instantes, as MR com excesso de energia devem gerir a energia não usada, como por exemplo alimentarem mais cargas, recarregar o ESS se possível ou alimentar cargas presentes na rede de distribuição da cooperação entre MR. Porém, do instante 19 ( $h=19$ ) ao instante 24 ( $h=24$ ) a quantidade de energia gerada não satisfaz a quantidade de carga necessária para os consumos mínimos, havendo a necessidade de deslastre de carga por parte das MR com défice de energia, sendo o período mais crítico no instante 20 ( $h=20$ ).

A Figura 44 apresenta os preços (€/kWh) praticados no comércio de energia do mercado interno da cooperação de MR. O preço de energia é definido com base na interseção entre a quantidade de défice de energia possível alimentar e a oferta de compra.

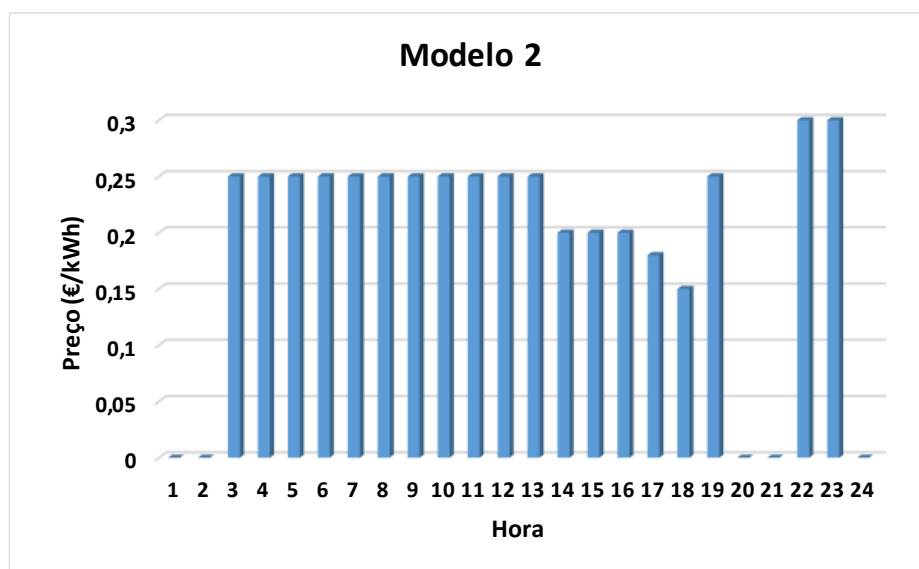


Figura 44 - Preços horários obtidos do modelo 2

Analisando a Figura 44 verifica-se que existe comércio de energia em quase todos os instantes. No entanto, existem cinco instantes em que não existe troca de energia, como no modelo 1. Nos instantes 1 ( $h=1$ ) e 2 ( $h=2$ ), não existe comércio de energia porque nestes dois instantes todas as MR da cooperação têm excesso de energia. Contudo, nos instantes 20 ( $h=20$ ), 21 ( $h=21$ ) e 24 ( $h=24$ ), não existe comércio de energia - todas as MR têm défice de energia, tornando impossível a cooperação entre MR. Neste modelo, são praticados cinco preços de energia diferentes ao longo dos 24 períodos. Os preços de energia são de 0.15 €/kWh, 0.18 €/kWh, 0.2 €/kWh, 0.25 €/kWh e 0.3 €/kWh. Nos instantes de 3 ( $h=3$ ) a 13 ( $h=13$ ) e no instante 19 ( $h=19$ ) o preço de energia corresponde a 0.25 €/kWh. Nos instantes de 14 ( $h=14$ ) a 16 ( $h=16$ ) o preço é de 0.2 €/kWh e nos instantes 17 ( $h=17$ ) e 18 ( $h=18$ ) o preço é de 0.18 €/kWh e de 0.15 €/kWh respetivamente. Nos instantes 22 ( $h=22$ ) e 23 ( $h=23$ ) o preço é de 0.3 €/kWh. Na maioria dos instantes o preço da energia comercializada é de 0.25 €/kWh. Isto deve-se ao facto deste modelo ser baseado em ofertas de compra, em que a ordem das ofertas é classificada por ordem de mérito descendente, o que neste caso

corresponde à “MR5”, pelo facto de ser uma das MR a ter a oferta de compra a um preço mais alto e de ser a MR a ter maior quantidade de défice de energia na maioria dos instantes.

### 8.3.3. Modelo 3 - Ofertas de Venda e Compra

Os gráficos de preço e quantidade de compensação de mercado para ofertas de venda correspondentes aos instantes de tempo  $h=15$  e  $h=22$  são apresentados nas Figura 45 e Figura 46. Os resultados do fluxo de potência para o instante de tempo  $h=15$  são apresentados nas Tabela 18 e Tabela 19, enquanto os resultados do fluxo de potência para o instante de tempo  $h=22$  são apresentados nas Tabela 20 e Tabela 21. Estas tabelas incluem os valores de magnitude e ângulo de fase para tensão, os valores de geração e carga em cada barramento, bem como as respetivas perdas associadas.

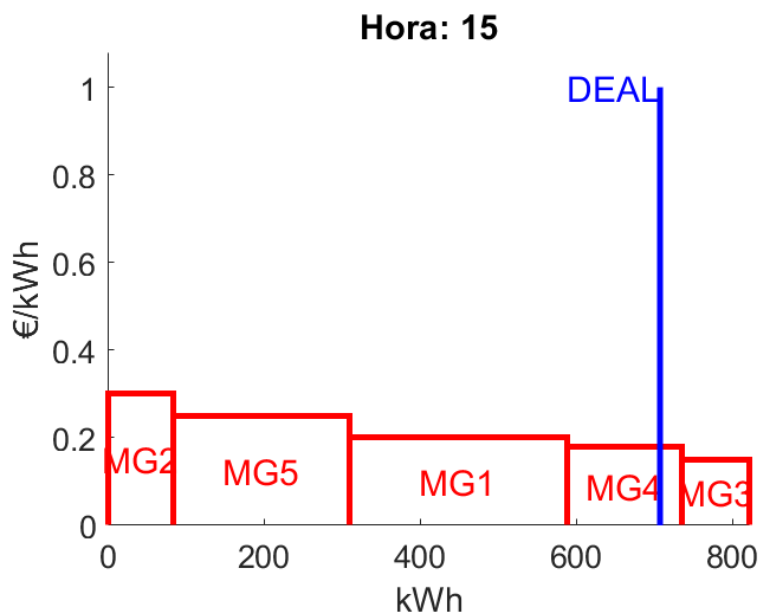


Figura 45 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante  $h=15$



Tabela 18 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=15

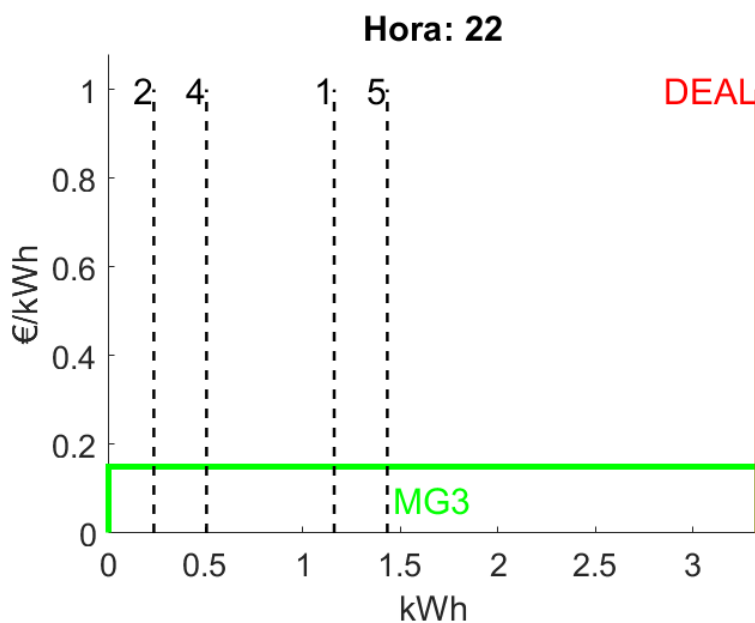
Barramento	Tensão		Geração		Carga	
	Mag (pu)	Âng (pu)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1,001	2,815	-	-	-	-
2	1,001	2,813	-	-	-	-
3	1,000	0,000	-43,71	104,38	349,39	104,82
4	1,002	2,826	-	-	-	-
5	1,000	6,911	675,79	39,34	105,05	31,51
6	1,002	2,824	-	-	-	-
7	1,000	3,812	160,03	-4,26	21,84	6,55
8	0,999	2,713	-	-	-	-
9	1,000	2,073	66,40	57,47	155,65	46,70
10	0,997	2,641	-	-	-	-
11	1,000	1,023	150,04	140,98	375,10	112,53

Tabela 19 - Trânsitos de potências nos ramos para o instante de tempo h=15

Ramo		Do Barramento		Para o Barramento		Perdas	
Do Barramento	Para o Barramento	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
1	2	94,62	11,99	-94,62	-20,28	0,006	0,00
2	6	-298,48	0,53	298,56	-11,55	0,073	0,05
1	4	-410,27	20,81	410,37	-29,04	0,103	0,08
4	6	160,37	-3,86	-160,36	-1,67	0,010	0,01
1	8	315,65	-32,80	-314,77	32,40	0,881	0,47
8	10	225,51	-22,64	-225,06	22,01	0,452	0,24
2	3	393,10	19,75	-393,10	-0,44	0,000	19,32
4	5	-570,74	32,90	570,74	7,83	-0,000	40,73
6	7	-138,19	13,22	138,19	-10,81	0,000	2,40
8	9	89,25	-9,76	-89,25	10,77	0,000	1,01
10	11	225,06	-22,01	-225,06	28,45	0,000	6,43

Observando a gráfico de preço e quantidade de compensação de mercado apresentado na Figura 45, as ofertas de compra são representadas por todas as MR neste instante de tempo (h=15). Este acontecimento deve-se ao facto de todas as MR já terem garantido o fornecimento das suas cargas cruciais devido ao total de excesso de energia ser superior ao

total de défice de energia. As ofertas de compra representadas no gráfico são definidas de acordo com a quantidade de energia que cada MR precisa para atingir os seus consumos de energia normais. A linha vertical de cor azul representa o total de excesso de energia que corresponde à soma do excesso de energia de todas as MR com excesso de energia neste instante de tempo. A Tabela 18 mostra a quantidade de energia ativa e reativa gerada e consumida por cada MR, bem como os respetivos valores de magnitude e ângulo de tensão. É possível também verificar que a tensão dos barramentos está dentro dos valores ideais (aproximadamente 1 pu), sendo a menor tensão de 0,997 pu no barramento 10. Analisando a Tabela 19 verifica-se a troca de energia entre todas as MR com algumas perdas de transmissão (aproximadamente 1,52 kW). A tarifa de energia neste instante de tempo é de 0,18 €/kWh, perfazendo um montante de 127,36 € ( $707,58 \times 1 \times 0,18$ ).



**Figura 46 - Preço e quantidade de compensação de mercado para o instante h=22**

Tabela 20 - Resultados nodais/barramentos para o instante de tempo h=22

Barramento	Tensão		Geração		Carga	
	Mag (pu)	Âng (pu)	P (kW)	Q (kVAr)	P (kW)	Q (kVAr)
1	1,001	0,008	-	-	-	-
2	1,001	0,008	-	-	-	-
3	1,000	0,000	2,39	-6,21	3,55	1,06
4	1,001	0,008	-	-	-	-
5	1,000	0,007	3,97	-6,01	4,21	1,26
6	1,001	0,008	-	-	-	-
7	1,000	0,032	6,36	-6,38	3,02	0,91
8	1,001	0,014	-	-	-	-
9	1,000	0,010	3,18	-5,58	3,69	1,11
10	1,001	0,016	-	-	-	-
11	1,000	0,006	4,77	-4,50	6,20	1,86

Tabela 21 - Trânsitos de potências nos ramos para o instante de tempo h=22

Ramo		Do Barramento		Para o Barramento		Perdas	
Do	Para o	P	Q	P	Q	P	Q
Barramento	Barramento	(kW)	(kVAr)	(kW)	(kVAr)	(kW)	(kVAr)
1	2	-0,46	-6,27	0,46	-2,03	0,000	0,00
2	6	-1,62	-5,26	1,62	-5,80	0,000	0,00
1	4	-1,48	-5,05	1,48	-3,24	0,000	0,00
4	6	-1,71	-4,04	1,71	-1,49	0,000	0,00
1	8	1,94	11,32	-1,94	-12,19	0,001	0,00
8	10	1,43	5,50	-1,43	-6,37	0,000	0,00
2	3	1,16	7,28	-1,16	-7,28	0,000	0,01
4	5	0,24	7,28	-0,24	-7,28	0,000	0,01
6	7	-3,33	7,29	3,33	-7,29	0,000	0,01
8	9	0,51	6,69	-0,51	-6,69	-0,000	0,01
10	11	1,43	6,37	-1,43	-6,36	0,000	0,01

Observando a gráfico de preço e quantidade de compensação de mercado apresentado na Figura 46, verifica-se que existe apenas uma ofertas de venda correspondendo à única MR com excesso de energia neste instante de tempo (h=22). Neste caso, o deslastre de carga é aplicado às restantes MR com défice de energia devido ao total de excesso de energia ser inferior ao total de défice de energia. A linha vertical de cor vermelha representa o total de

défice de energia posteriormente ao deslastre de carga, correspondendo assim ao total de excesso de energia. Deste modo, as MR com défice de energia são sujeitas ao deslastre de carga de forma proporcional à sua quantidade de défice de energia, representado por linhas verticais a tracejado.

A Tabela 20 mostra a quantidade de energia ativa e reativa gerada e consumida por cada MR, bem como os respectivos valores de magnitude e ângulo de tensão. É possível também verificar que a tensão dos barramentos está dentro dos valores ideais (aproximadamente 1 pu). Analisando a Tabela 21 é possível visualizar que todas as MR com défice de energia são fornecidas pela “MR3” com perdas de transmissão desprezáveis. A tarifa neste instante de tempo é de 0,15 €/kWh, perfazendo um montante de 0,4995 € ( $3,33 \times 1 \times 0,15$ ).

Os dois instantes analisados anteriormente ( $h=15$  e  $h=22$ ) enquadram-se num conjunto de simulações de 24 períodos. A Figura 47 mostra o resumo hora a hora para os 24 períodos do modelo 3, em que a troca de energia no grupo de MR é realizada através de ofertas de venda para que todas a MR garantam os seus consumos mínimos, ou através de ofertas de compra de modo a que as MR possam aumentar as suas cargas, aproximando-se dos seus perfis de consumo normal. A figura apresenta as quantidades de carga necessária para garantir os consumos mínimos (Carga\_1 - coluna azul), energia gerada (Gen - coluna laranja), energia excedente (Exc\_1 - coluna amarela), quantidade necessária de deslastre de carga (Des - coluna cinzenta), carga necessária para garantir ou aproximar dos consumos normais (Carga\_2 - coluna azul escura) e a quantidade de energia excedente (Exc\_2 - coluna verde) após garantir os consumos normais. Neste modelo, como anteriormente referido, o comércio de energia no grupo de MR é efetuado através de ofertas de venda com base em consumos mínimos (instantes 1 ( $h=1$ ) a 24 ( $h=24$ )), seguindo a mesma estrutura do modelo 1. Deste modo, é importante referir que para este modelo o resumo hora a hora, com base em consumos mínimos, também apresenta os mesmos resultados que o modelo 1, uma vez que os dados são os mesmos relativamente à energia e aos preços nas ofertas de venda. Porém, após a comercialização de energia através de ofertas de venda para os consumos mínimos, existem períodos em que há excesso de energia. Nestes instantes (instantes 3 ( $h=3$ ) a 18 ( $h=18$ )), são realizadas ofertas de compra de modo a que as MR da cooperação possam garantir ou aproximar dos seus perfis de consumo normal, seguindo a mesma estrutura do modelo 2, mas com base em consumos normais.

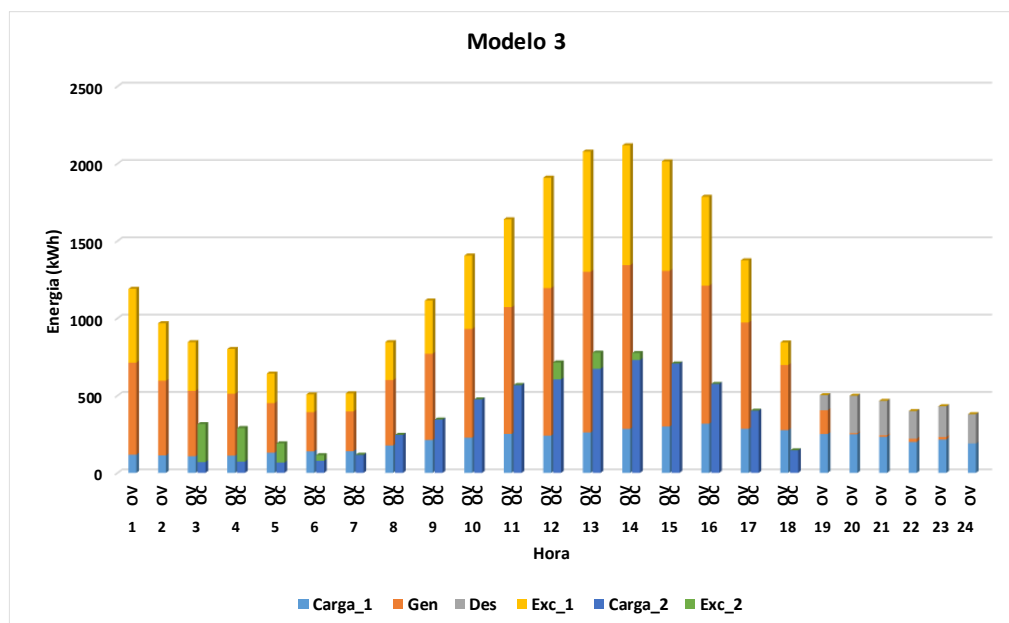


Figura 47 - Resultados horários obtidos a partir do modelo 3

No modelo 3, tal como nos modelos anteriores, verifica-se que as MR da cooperação conseguem satisfazer as suas cargas cruciais em 75% do tempo, através do comércio de energia com base em ofertas de venda (Figura 47). O período onde existe maior necessidade de carga para satisfazer os consumos mínimos corresponde ao instante 16 (h=16). No entanto, a quantidade de energia gerada nesse instante é suficiente para alimentar a respetiva carga. A quantidade de energia gerada do instante 1 (h=1) ao instante 18 (h=18) é superior á quantidade de carga necessária para garantir os consumos mínimos na cooperação de MR, existindo excesso de energia nestes instantes. Porém, do instante 19 (h=19) ao instante 24 (h=24) a quantidade de energia gerada não satisfaz a quantidade de carga necessária para os consumos mínimos, havendo a necessidade de deslastre de carga por parte de todas as MR com déficit de energia, sendo o período mais crítico no instante 20 (h=20). Através da Figura 47, também é possível analisar o comércio de energia com base em ofertas de compra (instantes 3 (h=3) a 18 (h=18)). Nestes instantes, as MR após terem garantido a alimentação das suas cargas cruciais, efetuam ofertas de compra de modo a que possam garantir ou aproximarem-se dos seus consumos normais. Analisando a Figura 47, verifica-se que em cerca de 44% do tempo em que ocorrem ofertas de compra as MR conseguem satisfazer as suas cargas normais. O período onde existe maior necessidade de carga para satisfazer os

consumos normais corresponde ao instante 14 (h=14). No entanto, a quantidade de energia gerada nesse instante é suficiente para alimentar a respetiva carga. É possível visualizar também que dos instantes 3 (h=3) a 6 (h=6) e 12 (h=12) a 14 (h=14) a quantidade de energia disponível é superior à quantidade de energia necessária para garantir os consumos normais, sobrando energia nesses instantes. No entanto, dos instantes 7 (h=7) a 11 (h=11) e 15 (h=15) a 18 (h=18), as MR apenas conseguem aproximar-se dos seus consumos normais. Por último, verifica-se que este modelo permite aproveitar o excesso de energia após as MR garantirem os consumos mínimos. Contudo, nos instantes em que há sobra de energia após as MR garantirem os seus consumos normais, as MR com excesso de energia devem gerir a energia não usada, como por exemplo alimentarem mais cargas, recarregar o ESS se possível ou alimentar cargas presentes na mesma rede de distribuição das MR.

A Figura 48 apresenta os preços (€/kWh) praticados no comércio de energia do mercado interno da cooperação entre MR. A figura apresenta o preço de energia com base nas ofertas de venda (Preço\_OV - coluna azul) e o preço de energia com base em ofertas de compra (Preço\_OC - coluna laranja) em cada instante. O preço de energia é definido com base na interseção entre a quantidade de défice de energia possível alimentar e a oferta de venda ou a oferta de compra.

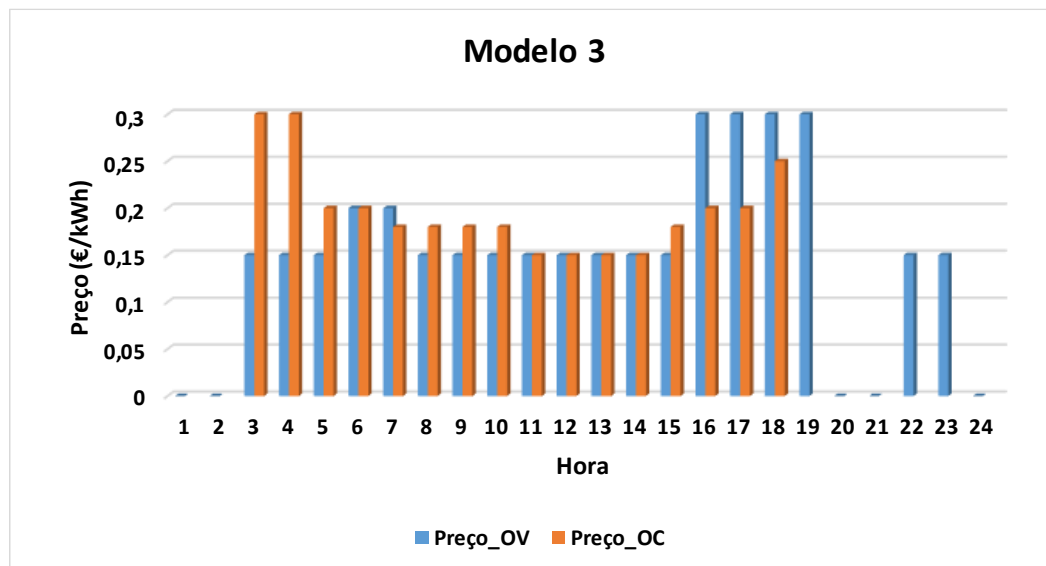


Figura 48 - Preços horários obtidos do modelo 3

Analisando a Figura 48, verifica-se que neste modelo os preços praticados com base nos consumos mínimos (ofertas de venda) são os mesmos que o modelo 1 em todos os instantes, uma vez que segue a mesma estrutura. Neste modelo, são praticados nas ofertas de venda três preços de energia diferentes ao longo dos 24 períodos. Os preços de energia são de 0.15 €/kWh, 0.2 €/kWh e 0.3 €/kWh. Nos instantes de 3 (h=3) a 5 (h=5), de 8 (h=8) a 15 (h=15) e nos instantes 22 (h=22) e 23 (h=23) o preço de energia corresponde a 0.15 €/kWh. Nos instantes 6 (h=6) e 7 (h=7) o preço é de 0.2 €/kWh e dos instantes 16 (h=16) a 19 (h=19) é de 0.3 €/kWh. Na maioria dos instantes o preço da energia comercializada é de 0.15 €/kWh. Isto deve-se ao facto deste modelo ser baseado em ofertas de venda para consumos mínimos, em que a ordem das ofertas é classificada por ordem de mérito ascendente, o que neste caso corresponde à “MR3”, pelo facto de ter a oferta de venda a um preço mais baixo e de ter a quantidade de energia necessária para satisfazer o défice de energia no grupo na maioria dos instantes. Relativamente ao comércio de energia com base em consumos normais (ofertas de compra), verifica-se através da Figura 48 que neste modelo são praticados cinco preços de energia diferentes ao longo dos 16 períodos. Os preços de energia praticados nestes instantes são de 0.15 €/kWh, 0.18 €/kWh, 0.2 €/kWh, 0.25 €/kWh e 0.3 €/kWh. Nos instantes 3 (h=3) e 4 (h=4) o preço de energia corresponde a 0.3 €/kWh. Nos instantes 5 (h=5), 6 (h=6), 16 (h=16) e 17 (h=17) o preço de energia corresponde a 0.2 €/kWh. Dos instantes 7 (h=7) a 10 (h=10) e instante 15 (h=15) o preço de energia é de 0.18 €/kWh e de 0.15 €/kWh dos instantes 11 (h=11) a 14 (h=14). Por fim, no instante 18 (h=18) o preço de energia corresponde a 0.25 €/kWh. Neste modelo, o preço de energia mais comercializada é de 0.18 €/kWh. Isto deve-se ao facto deste modelo ser baseado em ofertas de compra para consumos normais, em que a ordem das ofertas é classificada por ordem de mérito descendente, o que neste caso corresponde à “MR4”, pelo facto da sua oferta de compra ter um preço que coincide com a quantidade de défice de energia possível alimentar na maioria dos instantes. Por último, como nos modelos anteriores, existem cinco instantes em que não há troca de energia. Nos instantes 1 (h=1) e 2 (h=2), não existe comércio de energia porque nestes dois instantes todas as MR da cooperação têm excesso de energia. Contudo, nos instantes 20 (h=20), 21 (h=21) e 24 (h=24), não existe comércio de energia porque todas as MR têm défice de energia, tornando impossível a cooperação entre MR.

### 8.3.4. Comparação de Modelos

Comparando os três modelos anteriormente apresentados, é notório que o modelo 3 é relativamente melhor e mais completo que os outros dois modelos. O modelo 3 tem como principal vantagem a possibilidade de vender o excesso de energia às MR com o maior preço de compra. No entanto, depende sempre do ciclo de operação de cada MR e se os ESS podem ou não ser carregados. Porém, se todas as MR participantes na cooperação não puderem receber o excesso de energia (*i.e.*, se os ESS estiverem carregados ou as MR estiverem a operar à potência nominal total) o excesso de energia excedente pode ser distribuído pelos edifícios localizados na mesma rede de distribuição. Nos instantes de tempo em que existe deslastre de carga, o modelo 1 distribui o excesso de energia pelas MR com déficit de energia de forma proporcional, enquanto o modelo 2 aplica o excesso de energia às MR com déficit de energia e com ofertas de compra mais altas. Deste modo, o modelo 1 considera a cooperação entre várias MR, sendo que utiliza as ofertas de venda para o excesso de energia, distribuindo essa energia proporcionalmente pelas MR com déficit de energia. Por outro lado, o modelo 2 suporta apenas os interesses individuais de cada MR, uma vez que utiliza ofertas de compra com base nas necessidades de energia de cada MR. Ao contrário do modelo 1, no modelo 2, apenas as MR com preços de compra mais altos recebem o excesso de energia. No entanto, pode ser aplicada ao modelo 2 uma abordagem semelhante à do modelo 1, para apoiar a cooperação entre várias MR. Neste caso, as MR precisariam de pré-definir um preço de compra para quando existe deslastre de carga. O preço de compra poderia ser igual ao preço da energia da concessionária, para ser o mais transparente possível para cada MR. Uma outra abordagem para o modelo 2 ou 3 consistiria em pré-definir preços de compra para o excesso de energia a ser fornecida às cargas com diferentes prioridades, como apresentado na Figura 49. As ofertas de compra para cargas com diferentes prioridades seriam classificadas por ordem de mérito decrescente do preço de energia. As MR poderiam por exemplo, definir um preço de compra alto para a quantidade de energia necessária para alimentar as cargas cruciais (consumos mínimos), um preço de compra médio para a quantidade de energia necessária para alimentar as cargas não cruciais (consumos normais), ou vice-versa. Este tipo de estruturas seriam úteis (e necessárias) para, por exemplo, cumprir com os cadernos de encomendas das empresas, assegurando um preço de compra baixo para alimentar quaisquer outras cargas associadas ao edifício, mas não relacionadas à produção dos bens.



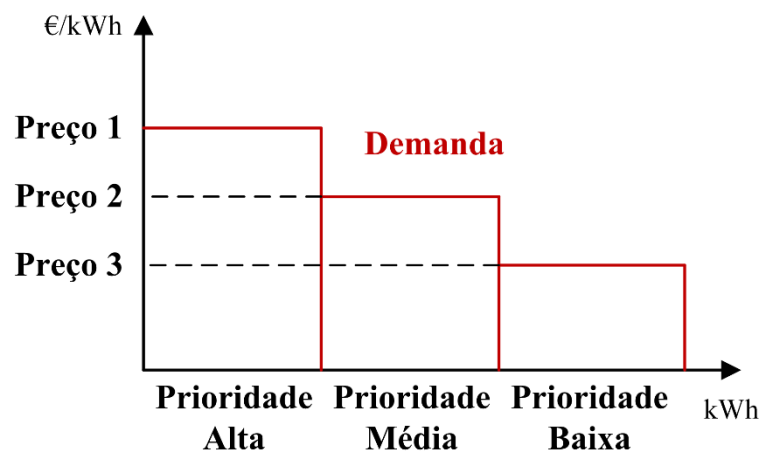


Figura 49 - Preços para o excesso de energia de acordo com as diferentes prioridades de carga



## 9. CONCLUSÃO

---

O conteúdo da presente dissertação aborda aspetos importantes sobre a cooperação e operação dos grupos de MR, tendo como foco o modo de operação isolado. Esses aspetos foram referentes a estratégias de controlo e de gestão de energia, configurações de arquitetura, segurança cibernética e mercados de energia. O conceito de grupo de MR consiste na operação de múltiplas MR (MMR) interconectadas, formando um grupo de MR controláveis, em que cada sistema beneficia desta cooperação tanto no modo conectado à rede principal como no modo isolado. A cooperação entre MR é vista como uma solução viável para mitigar a operação instável de uma única MR durante o modo de operação isolado.

A maioria das pesquisas apresentadas neste documento reúne aspetos como o controlo e a gestão de energia em grupos de MR. Através da pesquisa realizada concluiu-se que a conexão de MR em série com a rede (GSIM) apresenta melhor desempenho durante o modo de operação isolado em comparação com a topologia em paralelo com a rede externa (GPCM). No entanto, a conexão mista, série-paralelo (MPSC) apresenta a vantagem das MR terem suporte de outras redes e a possibilidade de fornecer serviços auxiliares. Também se concluiu que apesar da tecnologia AC ser a mais utilizada na transmissão/distribuição de energia, o interesse pelos sistemas de corrente contínua tem vindo a aumentar, devido às perdas reduzidas e à ausência de energia reativa. Outras vantagens das MR DC são: maior fiabilidade e eficiência, maior controlo e interface com as fontes de energia renovável, sistema de armazenamento mais simples, bem como o aumento significativo de equipamentos a operar em modo DC, principalmente na área das telecomunicações e nos sistemas de potência utilizados nos veículos elétricos (EV). No que diz respeito à tecnologia de interconexão nas arquiteturas de MMR é recomendado adotar uma combinação de conversores eletrônicos de potência e transformadores, devido às suas principais características individuais. Portanto, este documento forneceu uma visão geral e comparativa de vários esquemas de controlo para a gestão de energia em grupos de MR, devendo ser escolhida a melhor arquitetura para cada aplicação em específico. De acordo com a pesquisa realizada, para melhorar a integração de energia renovável distribuída (DRE) em larga

escala, é recomendável substituir o convencional ponto de acoplamento comum (PCC) por uma unidade híbrida de acoplamento comum (HUCC) de modo a fornecer interfaces AC e DC.

A pesquisa realizada também abordou aspectos importantes da cooperação entre MR, como a integração de geração distribuída para minimizar as perdas de energia e aumentar indicadores de qualidade, bem como a importância da gestão da troca de energia entre todos os participantes (produtores, consumidores e *prosumers*) para facilitar e otimizar o comércio de energia. Os grupos de MR (MMR) permitem melhorar a resiliência, a estabilidade e a integração de mais recursos DER nos sistemas de energia. Nesta pesquisa também foi abordado o processo de troca de energia, bem como os custos operacionais associados, concluindo-se que a cooperação (troca de energia) entre MR, tendo em conta a proximidade geográfica, diminui significativamente os preços de energia (em alguns casos na ordem dos 50%), bem como as perdas na rede. Adicionalmente, foram analisados modelos de decisão (centralizado e descentralizado) para a comercialização de energia entre MR, bem como os mercados de energia P2P. Relativamente aos mercados de energia P2P foram apresentadas as suas principais características, bem como os seus principais benefícios no comércio de energia em termos de eficiência, resiliência, segurança, fiabilidade e flexibilidade. Para além dos mercados de energia P2P, também foi efetuada uma pesquisa relativamente à tecnologia *Blockchain* e a importância da sua aplicação nos mercados de energia na cooperação entre MR. A tecnologia *Blockchain* permite às MR efetuar transações de energia de forma mais segura, através de mecanismos de consenso descentralizados, contratos inteligentes e segurança criptográfica. Portanto, esta tecnologia permite a resolução de conflitos de interesses, fornecendo simetria de informação a todos os participantes, em que o pagamento é efetuado através de transações virtuais e utilizando moedas virtuais (criptomoedas). O uso da criptomoeda permite efetuar pagamentos praticamente instantâneos. A implantação deste novo modelo de mercado permite contornar os principais problemas das redes elétricas tradicionais, tais como: resiliência, segurança e sustentabilidade.

No que se refere à cibersegurança foi realizada uma breve pesquisa sobre os principais tipos de ataques cibernéticos e seus efeitos. Também foi tido em conta a análise do desempenho dos sistemas ciber-físicos (CPS) em termos de robustez, segurança e resiliência, bem como algumas estratégias de deteção de ataques. Nas MR (redes elétricas) o tipo de ataque mais comum é o *deception attack*.

O caso de estudo realizado abordou a cooperação entre MR autónomas num grupo de MR, permitindo que cada MR individual compartilhasse os seus recursos com as restantes MR vizinhas. Este estudo avaliou três mercados de energia distintos, adequados para a implementação em grupos de MR, de modo a facilitar e otimizar o comércio de energia, bem como garantir o fornecimento contínuo de energia das cargas cruciais durante o modo de operação isolado. De acordo com as simulações do algoritmo desenvolvido em *Matlab*, concluiu-se que o modelo 3 (cooperação de MMR com base em ofertas de venda e ofertas de compra) é o que apresenta melhor desempenho uma vez que permite aproveitar o excesso de energia após as MR garantirem os consumos mínimos, existindo períodos em que as MR podem aumentar as suas cargas ou até mesmo garantir os seus consumos normais. Nos períodos em que existe excesso de energia após as MR garantirem os seus consumos normais, as MR com excesso de energia devem gerir a energia não usada, como por exemplo alimentarem cargas presentes na rede de distribuição do grupo de MR. Os resultados também mostram que a distribuição proporcional do excesso de energia para as MR com défice de energia é mais adequada para um ambiente de cooperação entre MR. Porém, o fornecimento de energia excedente com base no preço de compra mais alto por parte das MR com défice apenas suporta os interesses individuais dessas MR.



## REFERÊNCIAS

---

- [1] A. G. Madureira, J. A. Peças Lopes, “Voltage and Reactive Power Control in MV Networks integrating MicroGrids”, *Renewable Energy & Power Quality Journal (RE&PQJ)*, vol. 1, no. 5, Mar. 2007.
- [2] R. Mateus, “Estudo de Microrredes Eléctricas Inteligentes”, Dissertação de Mestrado, *ESTT/IPT*, Tomar, nov. 2016.
- [3] A. Colmenar-Santos, C. Palacio, L. A. Enríquez-García, Á. López-Rey, “A Methodology for Assessing Islanding of Microgrids: Between Utility Dependence and Off-Grid Systems”, *Energies*, vol. 8, pp. 4436-4454, May 2015.
- [4] T. Dragicevic, X. Lu, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, “DC Microgrids-Part II: A Review of Power Architectures, Applications, and Standardization Issues”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 5, May 2016.
- [5] Z. Jiang, X. Yu, “Hybrid DC- and AC-linked microgrids: Towards Integration of Distributed Energy Resources”, *2008 IEEE Energy 2030 Conference*, pp. 1-8, Nov. 2008.
- [6] E. Bullich-Massagué, F. Díaz-González, M. Aragués-Peñalba, F. Girbau-Llistuella, P. Olivella-Rosell, A. Sumper, “Microgrid clustering architectures”, *Applied Energy*, vol. 212, pp. 340-361, Dec. 2017.
- [7] “Distribution Management System (DMS)”, Schneider Electric. [Available online: <https://www.schneider-electric.com/en/work/solutions/for-business/s4/electric-utilities-distribution-management-system/>] (Accessed: 2018-11-02)]
- [8] “EcoStruxure™ Power SCADA Operation 8.2”, Power management and control software, Schneider Electric. [Available online: <https://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/63067-ecostruxure™-power-scada-operation-8.2>] (Accessed: 2018-11-01)]

- [9] “EcoStruxure™ Power Monitoring Expert 8.2”, Energie management software, Schneider Electric. [Available online: <https://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/62919-ecostruxure%E2%84%A2-power-monitoring-expert-8.2> (Accessed: 2018-11-02)]
- [10] “Microgrid Plus Control System”, ABB. [Available online: <https://new.abb.com/distributed-energy-microgrids/our-offering/microgrid-plus-system> (Accessed: 2018-11-05)]
- [11] “Powermanager Software”, Powermanager V3.4, SIEMENS. [Available online: [https://w3.usa.siemens.com/powerdistribution/us/en/product-portfolio/power-monitoring/energy-management-software/powermanager/pages/powermanager\\_3\\_4.aspx](https://w3.usa.siemens.com/powerdistribution/us/en/product-portfolio/power-monitoring/energy-management-software/powermanager/pages/powermanager_3_4.aspx) (Accessed: 2018-11-07)]
- [12] “EcoStruxure Microgrid Advisor”, Software as service for your site’s energy performance, Schneider Electric. [Available online: <https://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/65896-ecostruxure-microgrid-advisor> (Accessed: 2018-11-06)]
- [13] “EcoStruxure Microgrid Operation”, On-site microgrid power production & demand management, Schneider Electric. [Available online: <https://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/65897-ecostruxure-microgrid-operation> (Accessed: 2018-11-05)]
- [14] “ADVANCED DISTRIBUTION MANAGEMENT SOLUTIONS WEBINARS: LEARN FROM THE EXPERTS”, General Electric. [Available online: <https://www.ge.com/power/software/advanced-distribution-management-solutions> (Accessed: 2018-11-06)]
- [15] “Universal Microgrid Controller”, SUSTAINABLE POWER SYSTEMS. [Available online: <http://www.sustainablepowersystems.com/products-services/universal-microgrid-controllertm/> (Accessed: 2018-11-07)]
- [16] “Applications”, SUSTAINABLE POWER SYSTEMS. [Available online: <http://www.sustainablepowersystems.com/applications/> (Accessed: 2018-11-07)]
- [17] “Multilin F650”, General Electric. [Available online: <https://www.gegridsolutions.com/Multilin/catalog/f650.htm> (Accessed: 2018-11-08)]



- [18] “Microgrid Control System - Legacy”, General Electric. [Available online: <https://www.gegridsolutions.com/multilin/catalog/mcs.htm> (Accessed: 2018-11-09)]
- [19] “Easergy T300”, A powerful Remote Terminal Unit for feeder automation, Schneider Electric. [Available online: <https://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/62399-easergy-t300/#tabs-top> (Accessed: 2018-11-09)]
- [20] “Load-shedding controller PML630”, A dedicated load-shedding controller that prevents power blackouts and outages in power networks, ABB. [Available online: <https://new.abb.com/medium-voltage/distribution-automation/distribution-automation-solutions/power-management-cpms/compact-load-shedding-solution/load-shedding-controller-pml630> (Accessed: 2018-11-12)]
- [21] “C90Plus - Legacy”, General Electric. [Available online: <https://www.gegridsolutions.com/multilin/catalog/c90plus.htm> (Accessed: 2018-11-12)]
- [22] “Acti 9 CDS”, Load shedding contactors, Schneider Electric. [Available online: [https://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/836-acti-9-cds/?filter=product\\_parent\\_category\\_id-166441786#tabs-top](https://www.schneider-electric.com/en/product-range-presentation/836-acti-9-cds/?filter=product_parent_category_id-166441786#tabs-top) (Accessed: 2018-11-12)]
- [23] M. J. Gonzalez-Redondo, A. Moreno-Munoz, V. Pallares-Lopez, R. J. Real-Calvo, “Influence of data-related factors on the use of IEC 61850 for power utility automation”, *Electric Power Systems Research*, vol. 133, pp. 269-280, Jan. 2016.
- [24] “Automação Elétrica com IEC 61850”, AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL. [Available online: <https://www.automacaoindustrial.info/automacao-eletrica-com-iec-61850/> (Accessed: 2018-11-14)]
- [25] Z. Shuai, J. Fang, F. Ning, Z. J. Shen, “Hierarchical structure and bus voltage control of DC microgrid”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3670-3682, Nov. 2018.
- [26] I. Ziouani, D. Boukhetala, A. Darcherif, B. Amghar, I. Abbasi, “Hierarchical control for flexible microgrid based on three-phase voltage source inverters operated in parallel”, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 95, pp. 188-201, Sep. 2017.

- [27] J. A. Peças Lopes, C. L. Moreira, A. G. Madureira, “Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, May 2006.
- [28] F. Bandejas, “Microgrid Architecture Evaluation for Small and Medium Size Industries”, Dissertação de Mestrado, *ESTT/IPT*, Tomar, nov. 2017.
- [29] E. M. Pinheiro, F. A. Bandejas, M. H. Gomes, P. M. Coelho, J. F. Fernandes, “Performance analysis of wind generators and PV systems in industrial small-scale applications”, *International Conference on Emerging and Renewable Energy: Generation and Automation (ICEREGA'18, Sousse, Tunisia)*, pp. 1-6, Oct. 2018.
- [30] E. Pinheiro, F. Bandejas, M. Gomes, P. Coelho, J. Fernandes, “Performance analysis of wind generators and PV systems in industrial small-scale applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 110, pp. 392-401, Apr. 2019.
- [31] J. Khan, M. H. Arsalan, “Solar power technologies for sustainable electricity generation – A review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 414-425, Nov. 2015.
- [32] S. Samadi, “The experience curve theory and its application in the field of electricity generation technologies – A literature review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 2346-2364, Sep. 2017.
- [33] M. H. Nehrir, C. Wang, K. Strunz, H. Aki, R. Ramakumar, J. Bing, Z. Miao, Z. Salameh, “A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: Configurations, Control, and Applications”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, pp. 392-402, Sep. 2011.
- [34] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, J. M. Carrasco, “Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 3881-3895, Dec. 2010.
- [35] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, “Energy storage systems – Characteristics and comparisons”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 1221-1250, Jan. 2007.

- [36] S. Mazzoni, S. Ooi, B. Nastasi, A. Romagnoli, “Energy storage technologies as techno-economic parameters for master-planning and optimal dispatch in smart multi energy systems”, *Applied Energy*, vol. 254, pp. 1-17, Aug. 2019.
- [37] Z. Ye, “Modeling and control of parallel three-phase PWM converters”, Ph.D. dissertation, Electrical Engineering, *Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, VA, USA*, Sep. 2000.
- [38] M. Goyal, A. Ghosh, “Microgrids interconnection to support mutually during any contingency”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 6, pp. 100-108, Mar. 2016.
- [39] S. Bala, G. Venkataramanan, “Autonomous power electronic interfaces between microgrids”, *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 3006-3013, Sep. 2009.
- [40] F. A. Bandejas, E. M. Pinheiro, M. H. Gomes, P. M. Coelho, J. F. Fernandes, “Review of the cooperation and operation of microgrids clusters”, *International Conference on Emerging and Renewable Energy: Generation and Automation (ICEREGA'19, Istanbul, Turkey)*, pp. 1-6, Oct. 2019.
- [41] M. P. Gil, J. L. Domínguez-García, F. Díaz-González, M. Aragués-Peñalba, O. Gomis-Bellmunt, “Feasibility analysis of offshore wind power plants with DC collection grid”, *Renewable Energy*, vol. 78, pp. 467-477, Feb. 2015.
- [42] P. Wu, W. Huang, N. Tai, S. Liang, “A novel design of architecture and control for multiple microgrids with hybrid AC/DC connection”, *Applied Energy*, vol. 210, pp. 1002-1016, July 2017.
- [43] C. Yuen, A. Oudalov, A. Timbus, “The Provision of Frequency Control Reserves From Multiple Microgrids”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.58, pp. 173-183, Jan. 2011.
- [44] J. Sanango, E. Samaniego, J. L. Espinoza, R. Sempértegui, “A Study of Microgrids through Cooperative Games including the Effect of Geographical Proximity”, *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference – Latin America (ISGT Latin America)*, pp. 1-5, Sep. 2017.

- [45] Y. Du, Z. Wang, G. Liu, X. Chen, H. Yuan, Y. Wei, F. Li, “A cooperative game approach for coordinating multi-microgrid operation within distribution systems”, *Applied Energy*, vol. 222, pp. 383-395, Apr. 2018.
- [46] W. Saad, Z. Han, H. V. Poor, “Coalitional Game Theory for Cooperative Micro-Grid Distribution Networks”, *2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, pp. 1-5, Jun. 2011.
- [47] M. A. Arif, M. Ndoeye, G. V. Murphy, K. Aganah, “A Cooperative Game Theory Algorithm for Distributed Reactive Power Reserve Optimization and Voltage Profile Improvement”, *2017 North American Power Symposium (NAPS)*, pp. 1-6, Sep. 2017.
- [48] R. Pilling, S. C. Chang, P. B. Luh, “Shapley Value-Based Payment Calculation for Energy Exchange between Micro- and Utility Grids”, *Games*, vol. 8, no. 4, pp. 1-12, Oct. 2017.
- [49] T. Hiller, “Quantitative overeducation and cooperative game theory”, *Economics Letters*, vol. 152, pp. 36-40, Dec. 2017.
- [50] K. Leyton-Brown, Y. Shoham, “Essentials of Game Theory: A Consise, Multidisciplinary Introduction”, Morgan&Claypool Publishers, 2008. [Available online: <http://physics.ujep.cz/~jskvor/KVM/TeorieHer/shoham.pdf> (Accessed: 2019-01-19)]
- [51] R. Gopalakrishnan, J. R. Marden, A. Wierman, “Characterizing distribution rules for cost sharing games”, *International Conference on NETwork Games, Control and Optimization (NetGCooP 2011)*, pp. 1-4, Oct. 2011.
- [52] A. Mondal, S. Misra, “Dynamic Coalition Formation in a Smart Grid: A Game Theoretic Approach”, *2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, pp. 1-5, Jun. 2013.
- [53] A. Hajiloo, N. Nariman-zadeh, A. Moeini, “Pareto optimal robust design of fractional-order PID controllers for systems with probabilistic uncertainties”, *Mechatronics*, vol. 22, pp. 788-801, May 2012.
- [54] G. E. Asimakopoulou, A. L. Dimeas, N. D. Hatziargyriou, “Leader-follower strategies for energy management of multi-microgrids”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 1909-1916, Dec. 2013.

- [55] I. S. Bayram, M. Z. Shakir, M. Abdallah, K. Qaraqe, “A survey on energy trading in smart grid”, *2014 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, pp. 1-5, Dec. 2014.
- [56] J. Matamoros, D. Gregoratti, M. Dohler, “Microgrids Energy Trading in Islanding Mode”, *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, pp. 1-6, Nov. 2012.
- [57] A. Maknouninejad, W. Lin, H. G. Harno, Z. Qu, M. A. Simaan, “Cooperative control for self-organizing microgrids and game strategies for optimal dispatch of distributed renewable generations”, *Energy Systems*, vol. 3, no. 1, pp. 23-60, Jan. 2012.
- [58] H. Xin, Z. Qu, J. Seuss, A. Maknouninejad, “A Self-Organizing Strategy for Power Flow Control of Photovoltaic Generators in a Distribution Network”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1462-1473, Aug. 2011.
- [59] R. J. Hamidi, H. Livani, S. H. Hosseinian, G. B. Gharehpetian, “Distributed cooperative control system for smart microgrids”, *Electric Power Systems Research*, vol. 130, pp. 241-250, Sep. 2015.
- [60] C. Huang, S. Weng, D. Yue, S. Deng, J. Xie, H. Ge, “Distributed cooperative control of energy storage units in microgrid based on multi-agent consensus method”, *Electric Power Systems Research*, vol. 147, pp. 213-223, Mar. 2017.
- [61] N. M. Alyazidi, M. S. Mahmoud, M. I. Abouheaf, “Adaptive critics based cooperative control scheme for islanded Microgrids”, *Neurocomputing*, vol. 272, pp. 532-541, Jul. 2017.
- [62] S. Thakar, A. S. Vijay, S. Doolla, “System reconfiguration in microgrids”, *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 17, pp. 1-13, Jan. 2019.
- [63] V. Bhattacharjee, I. Khan, “A non-linear convex cost model for economic dispatch in microgrids”, *Applied Energy*, vol. 222, pp. 637-648, Apr. 2018.
- [64] E. Mengelkamp, J. Gärttner, K. Rock, S. Kessler, L. Orsini, C. Weinhardt, “Designing microgrid energy markets: A case study: The Brooklyn Microgrid”, *Applied Energy*, vol. 210, pp. 870-880, Jun. 2017.

- [65] Y. Zhou, Z. Wei, G. Sun, K. W. Cheung, H. Zang, S. Chen, “A robust optimization approach for integrated community energy system in energy and ancillary service markets”, *Energy*, vol. 148, pp. 1-15, Feb. 2018.
- [66] S. Thakur, J. G. Breslin, “Peer to Peer Energy Trade Among Microgrids Using Blockchain Based Distributed Coalition Formation Method”, *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 1-17, May 2018.
- [67] E. M. Pinheiro, F. A. Bandejas, M. H. Gomes, P. M. Coelho, J. F. Fernandes, “Study of the cooperation among multiple microgrids in islanded operation mode”, *International Conference on Emerging and Renewable Energy: Generation and Automation (ICEREGA'19, Istanbul, Turkey)*, pp. 1-6, Oct. 2019.
- [68] J. J. Sikorski, J. Haughton, M. Kraft, “Blockchain technology in the chemical industry: Machine-to-machine electricity market”, *Applied Energy*, vol. 195, pp. 234-246, Mar. 2017.
- [69] R. Schleicher-Tappeser, “How renewables will change electricity markets in the next five years”, *Energy Policy*, vol. 48, pp. 64-75, Jun. 2012.
- [70] S. Marzal, R. Salas, R. González-Medina, G. Garcerá, E. Figueres, “Current challenges and future trends in the field of communication architectures for microgrids”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 3610-3622, Nov. 2017.
- [71] “Blockchain holds key to reinventing energy grid”, HUFFPOST. [Available online: [https://www.huffingtonpost.com/don-tapscott/blockchain-holds-key-to-r\\_b\\_11258136.html](https://www.huffingtonpost.com/don-tapscott/blockchain-holds-key-to-r_b_11258136.html) (Accessed: 2019-03-11)]
- [72] “Peer-to-Peer (P2P) Service”, Investopedia. [Available online: <https://www.investopedia.com/terms/p/peertopeer-p2p-service.asp> (Accessed: 2019-03-14)]
- [73] C. Long, J. Wu, Y. Zhou, N. Jenkins, “Peer-to-peer energy sharing through a two-stage aggregated battery control in a community Microgrid”, *Applied Energy*, vol. 226, pp. 261-276, Jun. 2018.
- [74] S. Lamparter, S. Becher, J. G. Fischer, “An agent-based market platform for smart grids”, *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, pp. 1689-1696, May 2010.

- [75] M. Mao, P. Jin, N. D. Hatziaargyriou, L. Chang, “Multiagent-Based Hybrid Energy Management System for Microgrids”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 938-946, Jul. 2014.
- [76] T. Logenthiran, R. T. Naayagi, W. L. Woo, V. T. Phan, K. Abidi, “Intelligent Control System for Microgrids Using Multiagent System”, *IEEE Journal Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 1036-1045, Oct. 2015.
- [77] S. Nakamoto, “Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System”, 2008. [Available online: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (Accessed: 2019-03-13)]
- [78] Y. Yuan, F. Y. Wang, “Towards blockchain-based intelligent transportation systems”, *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 2663-2668, Nov. 2016.
- [79] “A trading platform you can trust!!!”, P2P Trade. [Available online: <https://www.p2ptrade.org/> (Accessed: 2019-03-14)]
- [80] M. Mihaylov, S. Jurado, N. Avellana, K. V. Moffaert, I. M. Abril, A. Nowé, “NRGcoin: Virtual Currency for Trading of Renewable Energy in Smart Grids”, *11th International Conference on the European Energy Market (EEM14)*, pp. 1-6, May 2014.
- [81] E. A. Kawasmi, E. Arnautovic, D. Svetinovic, “Bitcoin-Based Decentralized Carbon Emissions Trading Infrastructure Model”, *Systems Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 115-130, Mar. 2015.
- [82] J. Green, P. Newman, “Citizen utilities: The emerging power paradigm”, *Energy Policy*, vol. 105, pp. 283-293, Mar. 2017.
- [83] Y. Zhang, J. Wen. “An IoT electric business model based on the protocol of bitcoin”, *2015 18th International Conference on Intelligence in Next Generation Networks*, pp. 184-191, Feb. 2015.
- [84] D. Vandervort, D. Gaucas, R. S. Jacques, “Issues in Designing a Bitcoin-Like Community Currency”, *International Conference on Financial Cryptography and Data Security*, pp. 78-91, Jan. 2015.

- [85] “JP Buntinx: IOTA: Internet of things without the blockchain?”, Council, 2016.  
[Available online: <http://bitcoinist.net/iota-internet-things-without-blockchain>  
(Accessed: 2019-03-15)]
- [86] J. M. Cohn, P. G. Finn, S. P. Nair, S. B. Panikkar, V. S. Pureswaran, “Autonomous Decentralized Peer-to-Peer Telemetry”, 2017. [Available online: <https://patentimages.storage.googleapis.com/da/c9/5b/b17dbce7de523d/US20170310747A1.pdf> (Accessed: 2019-03-14)]
- [87] D. Ding, Q.-L. Han, Y. Xiang, X. Ge, X.-M. Zhang, “A survey on security control and attack detection for industrial cyber-physical systems”, *Neurocomputing*, vol. 275, pp. 1674-1683, Oct. 2017.
- [88] X. Cao, P. Cheng, J. Chen, Y. Sun, “An online optimization approach for control and communication codesign in networked cyber-physical systems”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 439-450, Feb. 2013.
- [89] X. Guan, B. Yang, C. Chen, W. Dai, Y. Wang, “A comprehensive overview of cyber-physical systems: from perspective of feedback system”, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 3, no. 1, pp. 1-14, Jan. 2016.
- [90] T. Teoh, Y. Nguwi, Y. Elovici, N. Cheung, W. L. Ng, “Analyst intuition based hidden markov model on high speed, temporal cyber security big data”, *2017 13<sup>th</sup> International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD)*, pp. 2080-2083, Jul. 2017.
- [91] M. Chenine, J. Ullberg, L. Nordström, Y. Wu, G. N. Ericsson, “A framework for wide-area monitoring and control systems interoperability and cybersecurity analysis”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 633-641, Apr. 2014.
- [92] M. Pajic, J. Weimer, N. Bezzo, O. Sokolsky, G. J. Pappas, I. Lee, “Design and implementation of attack-resilient cyberphysical systems: with a focus on attack-resilient state estimators”, *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 37, no. 2, pp. 66-81, Apr. 2017.
- [93] P. Nanda, C. K. Panigrahi, A. Dasgupta, “Phasor Estimation and Modelling Techniques of PMU - A review”, *Energy Procedia*, vol. 109, pp. 64-77, Mar. 2017.



- [94] H. Sadreazami, A. Mohammadi, A. Asif, K. N. Plataniotis, “Distributed-Graph-Based Statistical Approach for Intrusion Detection in Cyber-Physical Systems”, *IEEE Transactions on Signal and Information Processing over Networks*, vol. 4, no. 1, pp. 137-147, Mar. 2018.
- [95] B. Kailkhura, Y. S. Han, S. Brahma, P. K. Varshney, “Distributed Bayesian Detection in the Presence of Byzantine Data”, *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 63, no. 19, pp. 5250-5263, Oct. 2015.
- [96] M. Meriem et al., “Study of State Estimation Using Weighted-Least-Squares Method (WLS)”, *2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM)*, pp. 1-5, Oct. 2016.
- [97] K. Manandhar, X. Cao, F. Hu, Y. Liu, “Detection of faults and attacks including false data injection attack in smart grid using Kalman filter”, *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, vol. 1, no. 4, pp. 370-379, Dec. 2014.
- [98] G. Welch, G. Bishop, “An Introduction to the Kalman Filter”, University of North California at Chapel Hill, TR 95-041, Jul. 2006. [Available online: [https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman\\_intro.pdf](https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf) (Accessed: 2018-12-27)]
- [99] “Intermediary between real world and cyberspace: Cyber-Physical Systems, the Fabric that Holds Together the IIoT”, HBM. [Available online: <https://www.hbm.com/en/6267/cyber-physical-systems-the-fabric-that-holds-together-the-iiot/> (Accessed: 2018-12-28)]
- [100] A. Zanni, “Cyber-physical systems and smart cities”, IBM, Apr. 2015. [Available online: <https://developer.ibm.com/articles/ba-cyber-physical-systems-and-smart-cities-iiot/> (Accessed: 2019-01-08)]
- [101] A. Ellis, “Improving Microgrid Cybersecurity”, Sandia National Laboratories, Nov. 2016. [Available online: <http://integratedgrid.com/wp-content/uploads/2017/01/5-Ellis-Improving-Microgrid-Cybersecurity.pdf> (Accessed: 2019-01-10)]
- [102] C. K. Veitch, J. M. Henry, B. T. Richardson, D. H. Hart, “Microgrid Cyber Security Reference Architecture”, Sandia National Laboratories, Jul. 2013. [Available online: <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2013/135472.pdf> (Accessed: 2019-01-09)]

- [103] “Achilles Test Platform from GE Digital”, General Electric. [Available online: [https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download\\_assets/achilles-test-platform-from-ge-digital-datasheet.pdf](https://www.ge.com/digital/sites/default/files/download_assets/achilles-test-platform-from-ge-digital-datasheet.pdf) (Accessed: 2019-01-14)]
- [104] “Microgrid Cybersecurity: Protecting and Building the Grid of the Future”, Microgrid Knowledge. [Available online: <https://microgridknowledge.com/white-paper/microgrid-cybersecurity-grid-future/> (Accessed: 2019-01-16)]
- [105] “Cyber Security for Industrial Control Systems: A New Approach”, DARKTRACE Industrial, 2017. [Available online: [https://www.smartgrid-forums.com/wp-content/uploads/2019/01/Cyber-Security-for-Industrial-Control-Systems\\_-A-New-Approach-1.pdf](https://www.smartgrid-forums.com/wp-content/uploads/2019/01/Cyber-Security-for-Industrial-Control-Systems_-A-New-Approach-1.pdf) (Accessed: 2019-01-17)]
- [106] “Cyber Defense for Energy & Utilities”, DARKTRACE Industry Spotlight. [Available online: [https://www.smartgrid-forums.com/wp-content/uploads/2019/01/Industry-Spotlight\\_-Cyber-Defense-for-Energy-Utilities-6.pdf](https://www.smartgrid-forums.com/wp-content/uploads/2019/01/Industry-Spotlight_-Cyber-Defense-for-Energy-Utilities-6.pdf) (Accessed: 2019-01-18)]
- [107] “How smart infrastructures work”, Powering an “always on” world, Schneider Electric, Nov. 2016. [Available online: [https://download.schneider-electric.com/files?p\\_enDocType=Cahier+Technique&p\\_File\\_Name=998-1268169\\_GMA-US\\_A\\_Interactive.pdf&p\\_Doc\\_Ref=998-1268169](https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Cahier+Technique&p_File_Name=998-1268169_GMA-US_A_Interactive.pdf&p_Doc_Ref=998-1268169) (Accessed: 2019-01-21)]
- [108] “O Enterprise Immune System”, DARKTRACE. [Available online: <https://www.darktrace.com/pt/tecnologia/#enterprise-immune-system> (Accessed: 2019-01-23)]
- [109] “ISA-95”, Setting the Standard for Automation, ISA. [Available online: <https://www.isa.org/belgium/standards-publications/ISA95/> (Accessed: 2019-01-25)]
- [110] “Energy+”, Case Study, DARKTRACE. [Available online: <https://www.smartgrid-forums.com/wp-content/uploads/2019/01/Energy.pdf> (Accessed: 2019-01-29)]
- [111] “Market Clearing”, Policonomics. [Available online: <https://policonomics.com/market-clearing/> (Accessed: 2019-10-29)]
- [112] A. C. Z. Souza, M. Castilla, “Microgrids Design and Implementation”, Springer International Publishing, 2019.









Instituto Politécnico de Tomar

[www.ipt.pt](http://www.ipt.pt)